

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

FACULDADE DE TECNOLOGIA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

**PROPOSTA DE UM BIODIGESTOR ANAERÓBIO
MODIFICADO PARA PRODUÇÃO DE BIOGÁS E
BIOFERTILIZANTE A PARTIR DE RESÍDUOS SÓLIDOS
ORGÂNICOS**

**GLEIDSON NERES LUSTOSA
ÍCARO HENDRIX BORGES DE MEDEIROS**

ORIENTADOR: RICARDO SILVEIRA BERNARDES

MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL EM ENGENHARIA CIVIL

BRASÍLIA/DF: DEZEMBRO/2014

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**PROPOSTA DE UM BIODIGESTOR ANAERÓBIO
MODIFICADO PARA PRODUÇÃO DE BIOGÁS E
BIOFERTILIZANTE A PARTIR DE RESÍDUOS SÓLIDOS
ORGÂNICOS**

**GLEIDSON NERES LUSTOSA
ÍCARO HENDRIX BORGES DE MEDEIROS**

MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE BACHAREL EM ENGENHARIA CIVIL.

APROVADA POR:

**RICARDO SILVEIRA BERNARDES, PhD (UnB)
(ORIENTADOR)**

**ARIUSKA KARLA BARBOSA AMORIM, DSc (UnB)
(CO-ORIENTADOR/EXAMINADOR INTERNO)**

**CONCEIÇÃO DE MARIA ALBUQUERQUE ALVES, PhD (UnB)
(EXAMINADOR EXTERNO)**

BRASÍLIA/DF, 11 de DEZEMBRO de 2014

FICHA CATALOGRÁFICA

LUSTOSA, GLEIDSON NERES ; MEDEIROS, ICARO H. BORGES

Proposta de um biodigestor anaeróbio modificado para produção de biogás e biofertilizante a partir de resíduos sólidos orgânicos. [Distrito Federal] 2014.

72 p., 297 mm (ENC/FT/UnB, Bacharel, Engenharia Civil, 2014)

Monografia de Projeto Final - Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.
Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

- | | |
|-------------------------|------------------|
| 1. Biodigestão | 2. Inoculante |
| 3. <i>Biodigestores</i> | 4. <i>Biogás</i> |

I. ENC/FT/U_nB

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

LUSTOSA, G.N ; MEDEIROS, I.H.B. Proposta de um biodigestor anaeróbio modificado para produção de biogás e biofertilizante a partir de resíduos sólidos orgânicos. Monografia de Projeto Final, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 72p.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR:GleidsonNeres Lustosa ; Icaro Hendrix Borges de Medeiros

TÍTULO DA MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL: Proposta de um biodigestor anaeróbio modificado para produção de biogás e biofertilizante a partir de resíduos sólidos orgânicos.GRAU / ANO: Bacharel em Engenharia Civil / 2014

É concedida à Universidade de Brasília a permissão para reproduzir cópias desta monografia de Projeto Final e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta monografia de Projeto Final pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

Gleudson Neres Lustosa

Rua 04 Qd 12 Lote 13 – Valparaíso/GO

72.870-058 - Valparaiso/GO – Brasil

gleidson_enc@hotmail.com

Icaro Hendrix Borges de Medeiros

QSA 14 Casa 18 – Taguatinga sul/DF

72015-140 – Brasília/DF – Brasil

icarohbm@gmail.com

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1: Vista em corte do biodigestor indiano.....	6
Figura 3.2: Vista em corte do biodigestor chinês.....	7
Figura 3.3: Vista em corte do biodigestor canadense.....	8
Figura 3.4: Esquema de um biodigestor de unidades europeias.....	9
Figura 3.5: Esquema de um biodigestor caseiro.....	9
Figura 3.6: Representação em corte de um biodigestor modelo Marinha.....	11
Figura 3.7: Fluxograma das fontes de biomassa, processos de conversão e energéticos produzidos (Balanço Energético Nacional - BEN. Brasília: MME).....	17
Figura 3.8: Etapas e fases de produção do biogás.....	19
Figura 5.1: Fluxograma de composição de etapas do biodigestor proposto.....	47

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1: Relação para 1 litro de biogás com outras fontes de energia.....	18
Tabela 3.2: Principais adubos orgânicos.....	27
Tabela 3.3: Dados de alguns estudos sobre digestão anaeróbia de resíduos sólidos.....	31-32
Tabela 4.1: Características físico-químicas dos inóculos e FORSUP.....	49
Tabela 5.1: Cardápio semanal do RU. Fonte: RU – UNB.....	41-43
Tabela 5.2: Tabela com o quantitativo de usuários que frequentaram o RU.....	43-44
Tabela 5.3: Peso em Kg dos Resíduos Sólidos Orgânicos Descartado pelo R.U.....	44
Tabela 5.4: Características físico-químicas dos inóculos e FORSUP da pesquisa.....	49
Tabela 5.5 – Poder calorífico de alguns combustíveis.....	50
Tabela 5.6: Diferenças de massa do MR inicial e final.....	51

LISTA DE SÍMBOLOS, NOMECLATURAS E ABREVIATURAS

BEN.....	Balanço Energético Nacional
DGM.....	Coefficiente que relaciona o diesel/gás metano
DQO.....	Demanda Química de Oxigênio
Fi.....	Fator de Inoculação
FORSU.....	Fração Orgânica de Resíduos Sólidos Urbanos
FORSUP.....	Fração Orgânica de Resíduos Sólidos Urbanos Preparada
MO.....	Matéria Orgânica
OECD.....	Organização para cooperação econômica e desenvolvimento
PDGM.....	Produção diária de gás metano
pH.....	Potencial Hidrogeniônico
PTMd.....	Peso total da mistura diária
RSO.....	Resíduo Sólido Orgânico
RSOD-RU.....	Resíduos Sólidos Orgânicos Degradáveis gerados pelo RU
RSU.....	Resíduos Sólidos Urbanos
RU.....	Restaurante Universitário
ST.....	Sólidos Totais
STi.....	Quantidade de Inoculante
SV.....	Sólidos Voláteis
SVT.....	Sólidos Voláteis Totais
TDH.....	Tempo de Detenção Hidráulica

RESUMO

A utilização de energia renovável é um tema abordado em todo o mundo devido à preocupação com a preservação do meio ambiente. Entre as energias renováveis, a biomassa se destaca pela excelente disponibilidade. A matéria orgânica é abundante e possui um grande potencial energético levando em consideração novas fontes de energia. Se fermentado corretamente em biodigestores, obtêm-se como um dos elementos finais o biogás, este produto tem em sua composição o gás metano (CH_4) que é altamente inflamável. Diante da preocupação com a produção de energia renovável, este projeto tem o objetivo de desenvolver um biodigestor para produção de biogás e biofertilizante a partir da degradação anaeróbia de resíduos sólidos. Partindo do levantamento bibliográfico e caracterização do local de instalação do biodigestor, tem-se a definição das conexões e da escala que o produto será desenvolvido. O resíduo sólido orgânico produzido no restaurante universitário (RU) da Universidade de Brasília (UNB) será a matéria utilizada no biodigestor proposto nesse projeto. O biogás obtido através do processo de digestão anaeróbia será convertido em energia térmica ou elétrica, através da oxidação térmica do metano, ou seja, sua queima. Tem-se assim um equipamento que além de dar destino adequado a matéria orgânica descartada diariamente no RU e diminuir a contaminação ambiental, evita a emissão de gás metano na atmosfera, produz um gás capaz de substituir as fontes convencionais de energia. O processo de biodigestão será melhorado através de técnicas construtivas e por meio da inclusão de elementos que possibilitarão um desempenho mais eficiente do biodigestor.

Palavras-chave: Biodigestor. Biogás . Matéria Orgânica. Preservação ambiental.

ABSTRACT

The use of renewable energy is a topic discussed all over the world due to concern for the preservation of the environment. Among the renewable energy, biomass stands out for its excellent availability. The organic matter is one of the most abundant, which has high energy potential. If properly fermented in biodigesters, is obtained as a final biogas elements, this product has in its composition methane (CH₄) which is highly flammable. Given the concern about the production of renewable energy, this project aims to develop a biodigesters to produce biogas and fertilizer from anaerobic degradation of solid waste. Based on the literature review and site characterization of digester installation, there is the definition of connections and scale that the product will be developed. The biomass used are organic solid waste produced at the university Restaurant (R.U), University of Brasilia (UNB). The biogas obtained from the anaerobic digestion process is converted into thermal or electrical energy through the thermal oxidation of methane, or a burn. So has up equipment that besides giving appropriate disposal of organic matter discarded daily in the R.U and reduce environmental contamination, avoids the emission of methane gas in the atmosphere, produces a gas can replace conventional energy sources. The digestion process is improved by constructive and by adding elements which enable more efficient performance of the digester techniques.

Keyword: Biodigester. Biogas . Organic Matter. Environmental Preservation.

ÍNDICE

LISTA DE FIGURAS	4
LISTA DE TABELAS.....	4
LISTA DE SÍMBOLOS, NOMECLATURAS E ABREVIATURAS.....	5
RESUMO	6
ABSTRACT	7
1.0 INTRODUÇÃO	1
2.0 OBJETIVOS.....	3
2.1 OBJETIVO GERAL	3
2.2 OBJETIVO ESPECÍFICOS	3
3.0 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
3.1 BIODIGESTORES	4
3.1.1 <i>Definição</i>	4
3.1.2 <i>Histórico dos Biodigestores no Mundo</i>	4
3.1.3 <i>Modelos de biodigestores</i>	5
3.1.4 <i>Tipos de Biodigestores</i>	11
3.1.5 <i>Escolha do tipo de Biodigestor</i>	12
3.1.6 <i>Equipamentos anexos</i>	12
3.1.7 <i>Biodigestores no Brasil</i>	13
3.2 MATRIZ ENERGÉTICAS OU FONTES ENERGÉTICAS	13
3.2.1 <i>Definição</i>	13
3.2.2 <i>Energia não renovável e renovável</i>	13
3.2.2.1 <i>Energia não renovável e renovável no Brasil e no mundo</i>	15
3.3 BIOMASSA	16
3.4 BIOGÁS	17
3.4.1 <i>Processo anaeróbio</i>	18
3.4.2 <i>Formação do biogás</i>	19
3.5 FATORES QUE INFLUENCIAM NA DIGESTÃO ANAERÓBIA	21
3.5.1 <i>Quantidade de matéria seca (MS)</i>	21
3.5.2 <i>Concentração de nutrientes</i>	22
3.5.3 <i>pH – Acidez ou Alcalinidade</i>	22
3.5.4 <i>Temperatura interna do biodigestor</i>	23
3.5.5 <i>Tempo de detenção hidráulica (TDH)</i>	23
3.5.6 <i>Concentração de sólidos voláteis (SV)</i>	24

3.5.7 Presença de substâncias tóxicas	24
3.5.8 Relação carbono/nitrogênio	24
3.6 FERTILIZANTE	24
3.6.1 Tipos de fertilizantes	25
3.6.2 Principais adubos nitrogenados	25
3.7 BIOFERTILIZANTE	26
3.7.1 Definição	26
3.7.2 Principais características do biofertilizante	27
3.7.3 Formas de aplicação e efeitos do biofertilizante	28
3.7.4 Importância da adubação	28
3.8 INOCULAÇÃO	28
4.0 METODOLOGIA	35
4.1 ETAPA 01	35
4.1.1 Caracterização do local e quantitativos	35
4.2 ETAPA 02	35
4.2.1 Dimensionamento e Caracterização do Biodigestor	35
4.2.2 Volume Total do Biodigestor	37
4.2.2.1 Volume diário ocupado pela mistura	37
4.2.2.2 Tempo de Detenção Hidráulica – TDH	37
4.2.2.3 Determinação dos volumes para os tanques 1 e 2 (Estágios 1 e 2)	37
4.2.2.4 Determinação do volume para o tanque 3 (Estágio 3)	38
4.2.2.5 Especificação do Tanque Utilizado	38
4.3 DESCRIÇÃO DAS ETAPAS DE PRODUÇÃO DO BIOGÁS ATRAVÉS DO BIODIGESTOR PROPOSTO	38
4.4 CONTROLE DA TEMPERATURA	39
4.5 PRODUÇÃO TEÓRICA DO GÁS METANO	39
4.6 UTILIZAÇÃO DO GÁS METANO	40
4.6.1 Consumo de Diesel pelo RU	40
4.6.2 Relação Diesel/Gás Metano	40
4.7 BIOFERTILIZANTE	40
5.0 RESULTADOS E ANÁLISES	41
5.1 ETAPA 01	41
5.1.1 Caracterização do local e quantitativos	41
5.2 ETAPA 02	44
5.2.1 Dimensionamento e Caracterização do Biodigestor	44
5.2.2 Volume Total do Biodigestor	46
5.2.2.1 Volume diário ocupado pela mistura	46
5.2.2.2 Tempo de Detenção Hidráulica – TDH	46
5.2.2.3 Volume dos tanques (estágios 1 e 2)	46
5.2.2.4 Volume do Tanque 3 (estágio 3)	46
5.2.2.5 Especificação do Tanque Utilizado	47

5.3	DESCRIÇÃO DAS ETAPAS DE PRODUÇÃO DO BIOGÁS ATRAVÉS DO BIODIGESTOR PROPOSTO.	47
5.4	CONTROLE DA TEMPERATURA	48
5.5	PRODUÇÃO TEÓRICA DO GÁS METANO	49
5.6	UTILIZAÇÃO DO GÁS METANO	50
5.6.1	<i>Consumo de Diesel pelo RU</i>	50
5.6.2	<i>Relação Diesel/Gás Metano</i>	50
5.7	BIOFERTILIZANTE	51
6.0	CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES	53
6.1	CONCLUSÕES	53
6.2	RECOMENDAÇÕES	53
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	55

1.0 INTRODUÇÃO

A energia sempre foi reconhecida como a base do desenvolvimento das civilizações ao redor do mundo. No final do século XIX, por exemplo, o mundo passou por um processo de modernização após a Revolução Industrial, principalmente devido a necessidade de novas fontes de energéticas, além da energia térmica, muito usada naquele momento. As fontes de energia podem ser classificadas em renováveis, conhecidas também como energia limpa, como exemplo da energia solar, eólica, biomassa e a hídrica, que obtêm repostas da natureza em períodos relativamente curtos de tempo e as não renováveis, também chamadas de energias sujas, cujas reservas esgotam sempre que utilizadas, sendo que a reposição das mesmas na natureza pode levar milhões de anos, ou simplesmente, não mais ocorrer.

As energias renováveis, com o passar do tempo ganharam mais força quanto a sua utilização, favorecendo assim seu desenvolvimento, disseminação e aplicação, tornando-se uma alternativa viável para a atual situação em que o mundo se encontra, com as crises de petróleo nos países produtores, grande fragilidade do sistema de hidroelétricas, que ocasionou os últimos apagões no Brasil, inviabilidade e perigo de construção de termelétricas, usinas nucleares e outras formas de energia suja, chamadas desta forma, pois a utilização das mesmas gera uma grande carga de poluentes e, conseqüente degradação ambiental, o qual é visível e notório do ponto de vista social, econômico e humano. (SILVA, *et al.*, 2009).

Segundo a ANEEL (2004), atualmente existem cerca de 2 trilhões de toneladas de biomassa no globo terrestre, ou seja, cerca de 400 toneladas per capita, o que corresponde a oito vezes o consumo de energia primária no mundo, atualmente de 400 EJ/ano. A biomassa pode ser encontrada em três estágios, sólida, líquida e gasosa e os dejetos animais são os melhores alimentos para os biodigestores, pelo fato de já saírem de seus intestinos carregados de bactérias anaeróbias.

Para Amaral *et al.* (2004), a fermentação desta biomassa em reatores anaeróbios apresenta uma excelente alternativa, pois além de reduzir a taxa da poluição e contaminação do ciclo, promove a geração do biogás, utilizado como fonte de energia térmica, mecânica e elétrica, permitindo ainda a utilização do resíduo final como biofertilizante. Existem diversas motivações para a elaboração de um projeto como este, para que com o uso de biodigestores, ocorra a redução da carga de matéria orgânica lançada no meio ambiente, como controlar a proliferação de moscas e emissão de odores ofensivos e desagradáveis, diminuir a emissão de dióxido de carbono (CO₂) e metano (CH₄) na atmosfera através da queima, mostrar o melhor

aproveitamento de restos de natureza orgânica e, principalmente, oferecer um melhor destino a esses materiais. Ainda como motivação temos a conscientização da comunidade sobre os impactos ambientais causados pela emissão de gases de efeito estufa na atmosfera, seu possível agravante no aquecimento global, ressaltando a importância da preservação de rios e afluentes, manutenção de níveis aceitáveis de saúde e de produção animal com cumprimento de regulamentos e leis da administração rural, também devem ser destacados.

Para ANEEL (2004), a médio e longo prazo, a exaustão de fontes não-renováveis e as pressões ambientalistas poderão acarretar maior aproveitamento energético da biomassa. Atualmente, a biomassa vem sendo cada vez mais utilizada na geração de eletricidade, principalmente em sistemas de co-geração e no suprimento de eletricidade para demandas isoladas da rede elétrica.

Foi identificado no Restaurante Universitário (RU) da Universidade de Brasília-UNB, uma problemática a respeito dos resíduos sólidos orgânicos que são gerados a partir da produção das refeições diárias (café da manhã, almoço e jantar) e também a partir do descarte das sobras que ficam nos pratos dos alunos. O restaurante produz uma quantidade considerável de resíduo sólido orgânico, que usado de forma adequada, pode ser uma fonte alternativa de energia.

Diante do problema quanto ao uso dos resíduos sólidos orgânicos descartados pelo RU e cientes de que o processo de fermentação natural acontece predominantemente em um intervalo de tempo muito elevado. Constatou-se a necessidade de reduzir o tempo de compostagem para obtenção de vantagens ambientais e econômicas.

Assim, este projeto foi movido por uma idéia sustentável e um desejo de colaborar com um mundo mais limpo e saudável. Portanto este trabalho tem o objetivo de desenvolver um biodigestor, baseado na fermentação anaeróbia, onde através da otimização do processo de compostagem da matéria orgânica poderemos alcançar e obter resultados que aumentem a produção de biogás.

Este é um trabalho de conclusão de curso para o grau de bacharel em Engenharia Civil.

2.0 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo deste trabalho é o desenvolvimento de um biodigestor, onde o processo de digestão anaeróbia será otimizado. As sobras de matéria orgânica geradas no restaurante universitário (RU) da Universidade de Brasília serão utilizadas como biomassa a ser fermentada anaerobiamente na produção de biogás, possibilitando assim um fim apropriado para o material descartado.

2.2 OBJETIVO ESPECÍFICOS

- Uso de um inoculante na bioestabilização anaeróbia da fração orgânica putrescível dos resíduos sólidos orgânicos. O inoculante será escolhido de acordo com sua eficiência e disponibilidade na região em que o biodigestor será instalado;
- Adaptação de um mecanismo de homogeneização granular (triturador) da matéria orgânica produzida nas refeições do restaurante universitário (RU) da Universidade de Brasília-UNB;
- Implantação de um sistema de aquecimento baseado na captação da energia solar. Onde a temperatura será estabilizada, melhorando o processo anaeróbio;
- Redução do tempo de detenção hidráulica ao longo do processo de biodigestão.

3.0 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Para a construção de um biodigestor usando matéria orgânica como biomassa a ser fermentada anaerobiamente para produção de biogás, parte-se da revisão bibliográfica, adquirindo o conhecimento necessário para dar prosseguimento ao projeto. Sendo assim, esse biodigestor possibilitará a produção de uma energia 100% renovável, logo, limpa.

3.1 Biodigestores

3.1.1 Definição

Um biodigestor, digestor ou biorreator pode ser definido como uma câmara de fermentação fechada, onde a biomassa sofre a digestão pelas bactérias anaeróbicas produzindo biogás. Em outras palavras, trata-se de um recipiente completamente fechado e vedado, impedindo qualquer entrada de ar, construído de alvenaria, concreto ou outros materiais, onde é colocado o material a ser degradado para posterior fermentação. Existem vários tipos de biodigestores, porém os mais difundidos são chineses, indianos e canadenses. Cada um possui sua particularidade, porém com objetivo semelhante criar condição anaeróbia, ou seja, total ausência de oxigênio para que a biomassa seja completamente degradada (Gaspar, 2003).

Tal aparelho, contudo, não produz o biogás, uma vez que sua função é fornecer as condições propícias para que um grupo especial de bactérias, as metanogênicas, degrade o material orgânico, com a conseqüente liberação do gás metano. (Gaspar, 2003, p.15).

3.1.2 Histórico dos Biodigestores no Mundo

Mesmo que comprovações históricas mostrem que a primeira instalação de biodigestores só tenha surgido na segunda metade do século XIX, há relatos que o biogás já era conhecido há muito tempo, pois a produção do mesmo a partir de resíduos orgânicos é um processo extremamente antigo. Porém, a descoberta do gás metano foi realizada pelo pesquisador italiano Alessandro Volta, que descobriu que o gás existia como componente do chamado gás dos pântanos, que era resultado da decomposição de restos vegetais em ambientes confinados. Através de várias pesquisas que difundiram o uso de biodigestores, foi criado em 1939 na cidade de Kampur, na Índia, o Institute Gobár Gás (Instituto de Gás de Esterco), onde foi criada a primeira usina de gás de esterco, que tinha por objetivos tratar os dejetos animais, obter biogás e aproveitar o biofertilizante. Foi esse trabalho pioneiro que permitiu a construção de quase meio milhão de biodigestores na Índia. A utilização do biogás na Índia, como fonte de energia, motivou a China a adotar tal tecnologia a partir de 1958, e

em 1972, já possuíam aproximadamente 7,2 milhões de biodigestores em atividade (Deublein & Steinhauser, 2008).

A partir da crise energética disparada em 1973, a implantação de biodigestores passou a ser interessante tanto para países ricos como países de terceiro mundo, mas em nenhum desses países, o uso dessa tecnologia foi ou é tão difundida como na China e na Índia. No caso da China o interesse pelo uso de biodigestores deveu-se, originalmente, a questões militares. Preocupada com a Guerra Fria, a China temeu que um ataque nuclear impedisse toda e qualquer atividade econômica (principalmente industrial). Entretanto, com a pulverização de pequenas unidades de biodigestores ao longo do país, algumas poderiam escapar ao ataque inimigo. Nos dias atuais, o foco do uso de biodigestores na China é outro. Como possui excedente de população, não seria recomendável mecanizar a atividade agrícola em larga escala, sendo que o uso de tratores e demais implementos resultaria em um índice de desemprego rural alarmante. Dessa forma, o governo chinês achou viável aperfeiçoar as técnicas rudimentares de cultivo do solo, com os biodigestores ocupando papel de destaque (Gaspar, 2003).

No caso da Índia, o país não pensava em guerras nucleares, pois sempre fez parte do grupo dos países conhecidos como não alinhados. A fome e a falta de combustíveis fósseis é que motivaram o desenvolvimento da tecnologia dos biodigestores. Logo, são dois extremos de utilização de biodigestores, onde chineses priorizam o biofertilizante para produção dos alimentos necessários a sua nação populosa e indianos focam no biogás para cobrir o imenso déficit de energia. Dessa maneira, foram desenvolvidos na época dois modelos diferentes de biodigestor: o modelo chinês e o modelo indiano (Barrera, 1993).

3.1.3 Modelos de biodigestores

3.1.3.1 Modelo Indiano

Na Figura 3.1 é apresentado o modelo indiano de biodigestor que tem como característica principal o uso de uma câmpanula flutuante como gasômetro, sendo que a mesma pode estar mergulhada sobre a biomassa em fermentação. Existe ainda uma parede central que divide o tanque de fermentação em duas câmaras, onde a função desta divisória é fazer com que o material circule por todo o interior da câmara de fermentação de forma homogênea. O biodigestor possui pressão de operação constante, ou seja, à medida que o biogás produzido não é consumido, o gasômetro desloca-se verticalmente, aumentando o volume deste, mantendo dessa forma a pressão constante em seu interior. Do ponto de vista construtivo, apresenta-se de fácil execução, contudo o gasômetro de metal pode encarecer o

custo final, e também à distância da propriedade pode dificultar o transporte inviabilizando a implantação deste modelo de biodigestor (Pereira, 1999).

MODELOS DE BIODIGESTORES

Modelo Indiano:

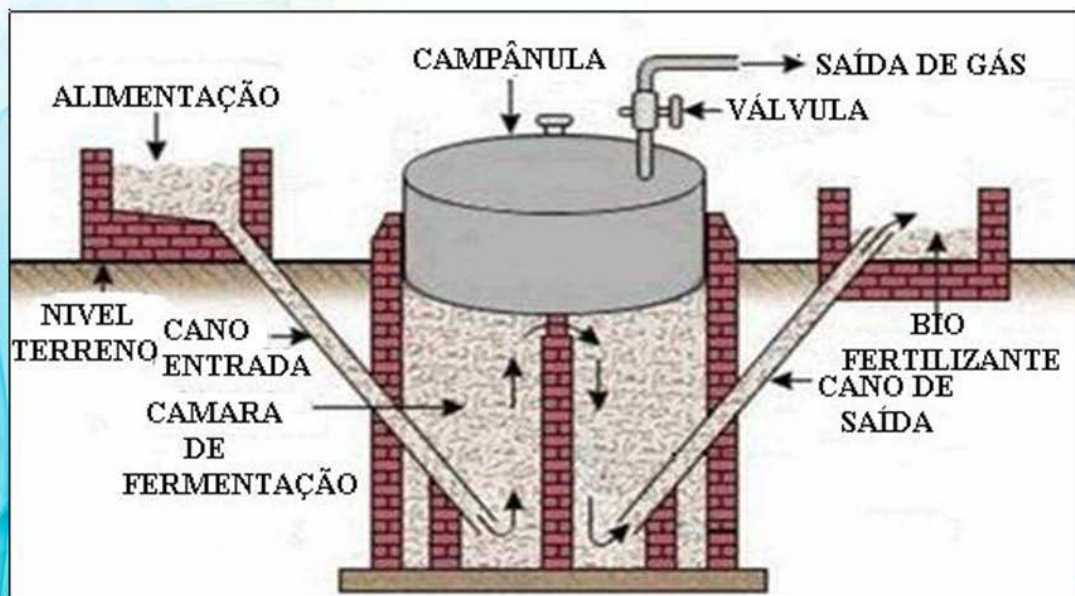


Figura 3.1. Vista em corte do biodigestor indiano (Fonseca, *et. al*, 2009.)

De acordo com Lucas Junior & Souza (2009), os principais componentes de um biodigestor modelo indiano são:

- caixa de carga (local de diluição dos dejetos);
- tubo de carga (condutor dos dejetos diluídos da caixa de carga para o interior do biodigestor);
- câmara de biodigestão cilíndrica (local onde ocorre a fermentação anaeróbia com produção de biogás);
- gasômetro (local para armazenar o biogás produzido formado por campânula que se movimenta para cima e para baixo);
- tubo-guia (guia o gasômetro quando este se movimenta para cima e para baixo);
- tubo de descarga (condutor para saída do material fermentado sólido e líquido);
- caixa ou canaleta de descarga (local de recebimento do material fermentado sólido e líquido);

- saída de biogás (dispositivo que permite a saída do biogás produzido para ser encaminhado para os pontos de consumo).

3.1.3.2 Modelo Chinês

Os principais componentes de um biodigestor modelo Chinês são os seguintes: caixa de carga, tubo de carga, câmara de biodigestão cilíndrica com fundo esférico, gasômetro em formato esférico, galeria de descarga e caixa de descarga (Lucas Junior *apud* Sousa, 2009).

Sendo assim uma melhor descrição do modelo chinês mostrado na Figura 3.2 seria que o mesmo é confeccionado sob a forma de uma câmara de fermentação cilíndrica em alvenaria (tijolo ou blocos), com teto impermeável, destinado ao armazenamento do biogás. Este biodigestor funciona com pressão hidráulica, onde o aumento de pressão em seu interior resulta no acúmulo do biogás na câmara de fermentação, induzindo-o para a caixa de saída. O biodigestor é constituído quase que totalmente em alvenaria, dispensando o uso de gasômetro com chapa de aço, obtendo uma redução de custos, porém podem ocorrer problemas com vazamento do biogás caso a estrutura não seja bem vedada e impermeabilizada. Neste tipo de biodigestor uma parte do biogás produzido na caixa de saída é liberada na atmosfera, reduzindo em parte a pressão interna do gás e devido a isso, o mesmo não é indicado para instalações de grande porte (Pereira, 1999).

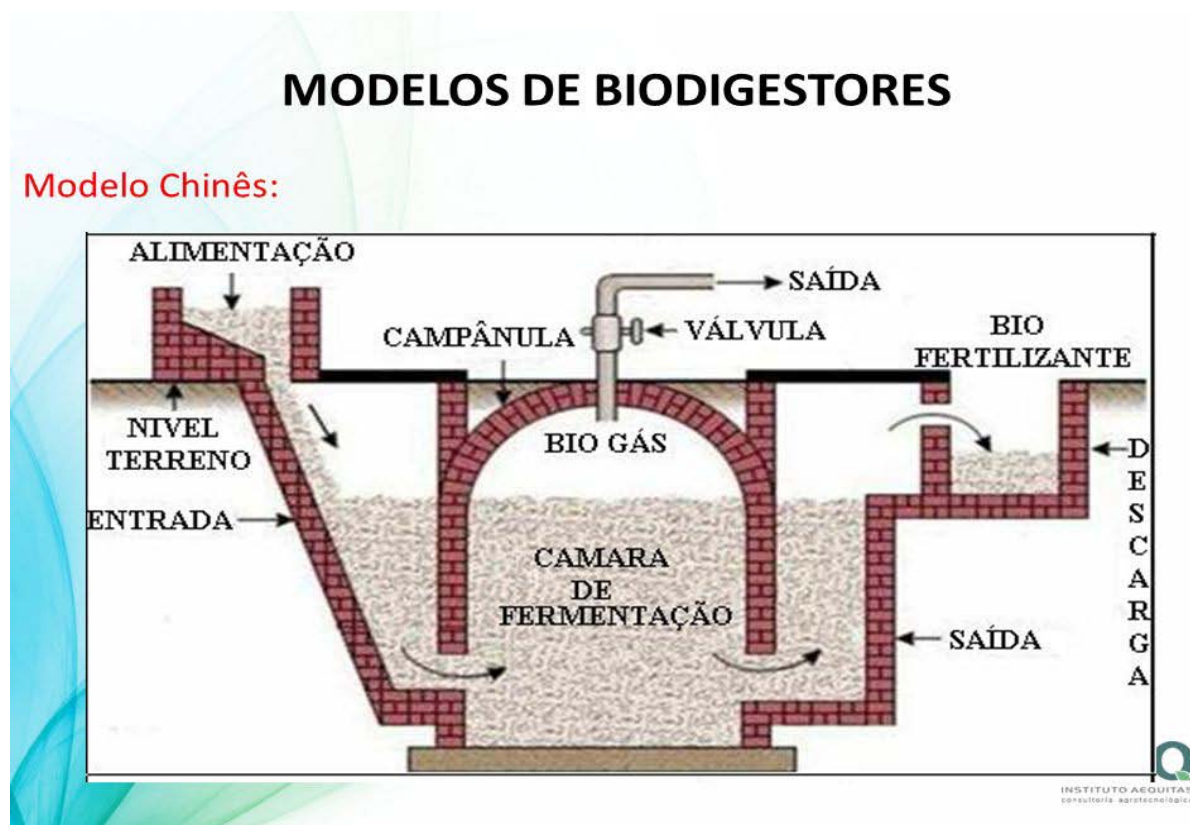


Figura 3.2. Vista em corte do biodigestor chinês (Deganutti, *et al.*, 2002.)

3.1.3.3 Modelo Canadense ou de fluxo tubular

O Canadense (Figura 3.3) é um tanque cavado no solo revestido internamente e recoberto com manta de PVC impermeável. Possui tubo de entrada para substrato e de saída para biogás e biofertilizante (Oliver, *et al.*, 2008).

Este modelo de biodigestor é mais recente e apresenta uma tecnologia bem mais moderna e avançada, porém menos complexa. Segundo Deublein *apud* Steinhäuser (2008) é um modelo tipo horizontal, apresentando uma caixa de carga em alvenaria e com a largura maior que a profundidade, possuindo, portanto, uma área maior de exposição ao sol, o que possibilita grande produção de biogás, evitando o entupimento. Durante a produção de biogás, a cúpula do biodigestor infla porque é feita de material plástico maleável (PVC), podendo ser retirada.

O biodigestor de fluxo tubular é amplamente difundido em propriedades rurais e é, hoje, a tecnologia mais utilizada dentre as demais. Neste tipo de biodigestor, o biogás pode ser enviado para um gasômetro separado, permitindo maior controle.

Embora o biodigestor descrito apresente a vantagem de ser de fácil construção, possui menor durabilidade como no caso da lona de plástica perfurar e deixar escapar gás (Lucas Junior *apud* Sousa, 2009).

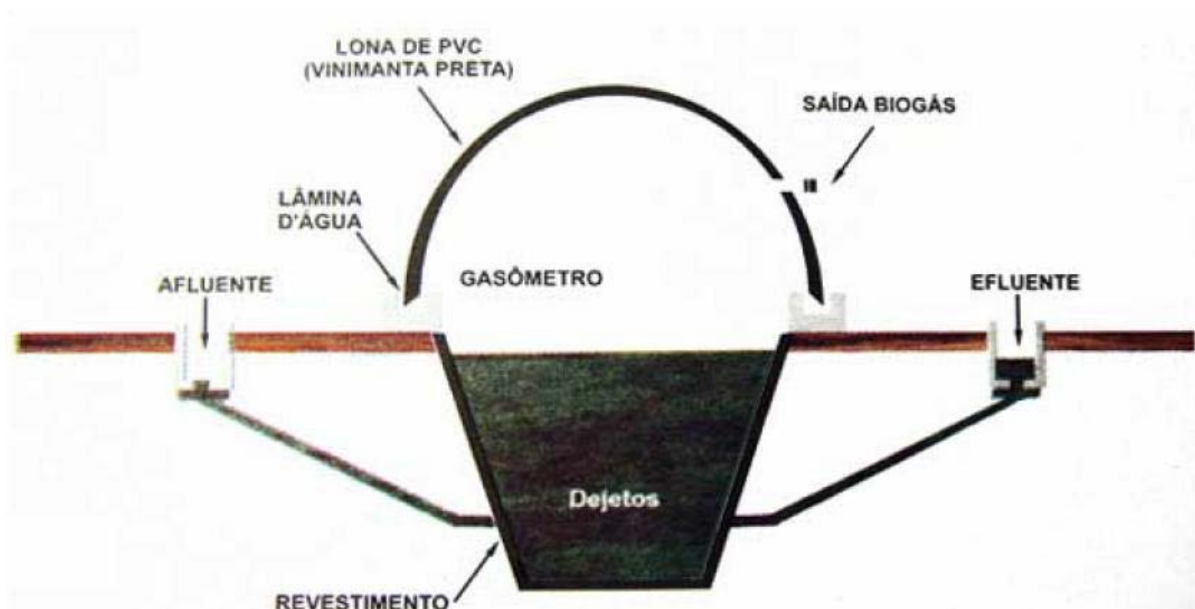


Figura 3.3. Vista em corte do biodigestor canadense (Oliver et al., 2008, p. 9)

3.1.3.4 Modelos Complexos (grande escala)

Os biodigestores de grande porte são construídos com base de concreto armado, com tubulações adequadas, bombas, trocadores de calor, agitadores, dois ou mais reatores (Figura

3.4). A unidade ainda possui equipamentos de controle de mais de 18 parâmetros diferentes desde temperatura, volume de carga, volume de saída controle de pH, controle de pressão, controle de acidez entre outros. Todo este controle é feito de forma automatizada (Deublein & Steinhauser, 2008).

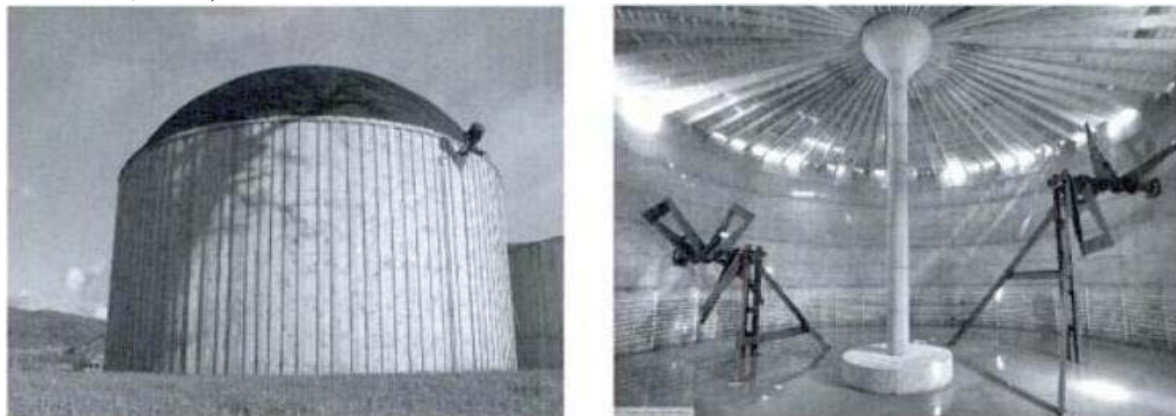


Figura 3.4 Esquema de um biodigestor de unidades européias (Deublein & Steinhauser, 2008, p.201)

3.1.3.5 Modelo Caseiro

Arruda *et al.*, (2002) propôs um tipo de biodigestor caseiro simples, para obtenção de biogás através da fermentação de esterco bovino chamado de biodigestor caseiro (Figura 3.5). A construção é feita a partir de um tambor metálico de 200 litros (0,2 m³), facilmente encontrado a preço reduzido, de fácil construção e montagem, garantindo o baixo custo final.

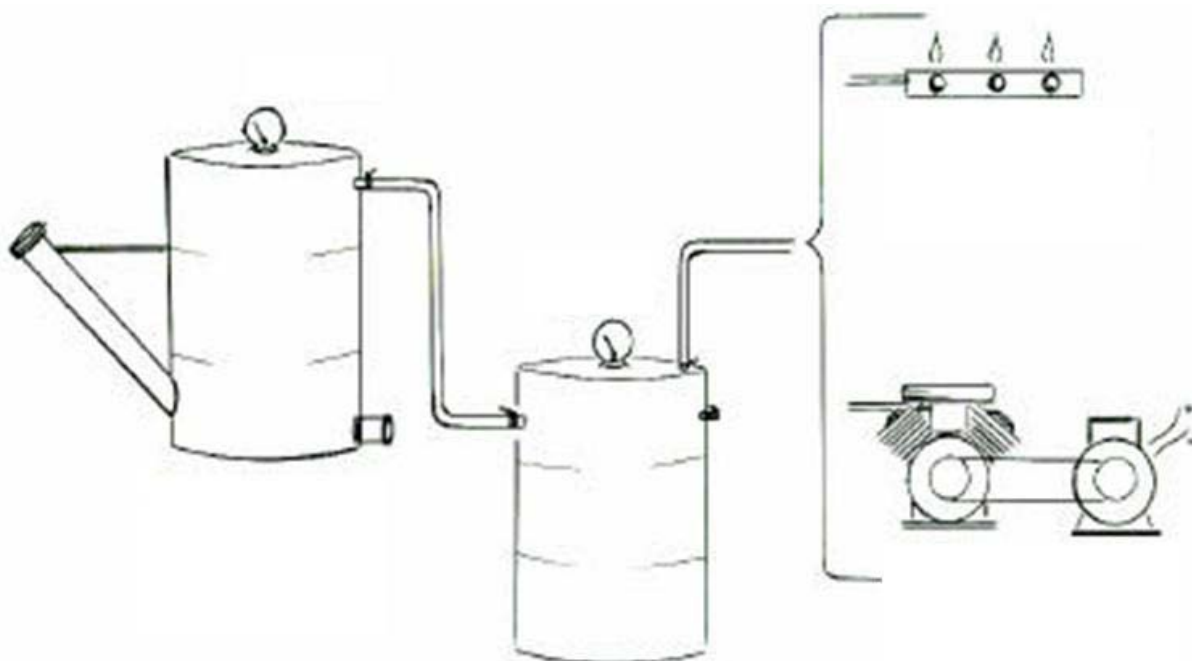


Figura 3.5. Esquema de um biodigestor caseiro (Arruda et al., 2002.)

Um biodigestor caseiro que também foi construído e premiado, foi desenvolvido por Gilberto Luis Souza da Silva e seus alunos. O projeto consistiu na construção de biodigestores que pudessem ser adquirido ou feito por pessoas de baixo poder aquisitivo, pois o material utilizado na construção do biodigestor foram dois tambores de 200 L cada, dois registros de 1/2", mangueira de gás e dois pinos de panela de pressão e o filtro foi construído com tubo de PVC de 1/2", conexões, palha de aço enferrujada e pelo de rabo de boi. A matéria orgânica utilizada foi o esterco de boi e de porco (BLOG, *online*, 2008).

1.1.3.6 Biodigestor modelo Marinha Brasileira

Na década de 1970, o Instituto de Pesquisa da Marinha do Brasil (IPqM) realizou estudos sobre biodigestores e acabou criando alguns modelos: Marinha I, com 5,5 m³ de capacidade para resíduo e produção de 1,8 a 3,0 m³ de biogás ao dia, Marinha II, com 22 m³ de capacidade para resíduo e produção de 6 a 10 m³ de biogás ao dia, Marinha III, com 65 m³ de capacidade para resíduo e produção de 15 a 30 m³ de biogás ao dia, além de mais alguns modelos especiais (Sousa, 1995).

O biodigestor desenvolvido pela Marinha do Brasil apresenta uma base quadrangular, com paredes de alvenaria revestidas por lona impermeável e uma cúpula de lona preta também impermeável. É um modelo mais raso e longo, o que lhe garante uma maior produtividade de gás por massa fermentada (Barrera, 2003). Sua utilização encontra maior barreira no que diz respeito ao espaço físico disponível para a instalação. Por ter uma profundidade pequena, necessita de uma grande área superficial para que consiga armazenar uma grande quantidade de resíduo (Sousa, 1995).

Esse modelo, como o apresentado na figura 3.6, é o mais indicado para projetos industriais e agroindustriais por ser versátil ao uso de diferentes resíduos orgânicos e ser capaz de armazenar grande quantidade de resíduo passível de sofrer fermentação anaeróbia, produzindo assim grande quantidade de biogás e estabilizando os dejetos que podem ser utilizados como biofertilizante (Oliveira, 2006).

Atualmente, esse modelo de biodigestor é mais difundido no Brasil devido ao aperfeiçoamento da manta impermeável que passou a ser confeccionada em Policloreto de Vinila (PVC), o que confere um menor custo e maior facilidade de instalação quando comparado com os modelos antigos (modelo Indiano e Chinês), além de apresentar maior resistência à corrosão provocada pela água e pelo ácido sulfídrico presentes na mistura gasosa. Outra vantagem é que o mesmo pode ser utilizado tanto em pequenos como em grandes projetos agroindustriais (Manual de Biodigestão, 2009).

Em comparação ao modelo Indiano, o modelo da Marinha apresenta a vantagem de poder receber grande quantidade de resíduos. Em comparação com o modelo Chinês, a vantagem está no fato de aquele sofrer rachaduras na sua estrutura devido à composição do solo brasileiro que sofre muita acomodação, o que muitas vezes provoca perda de gás e exige monitoramento e manutenção constantes (Oliveira, 2006).

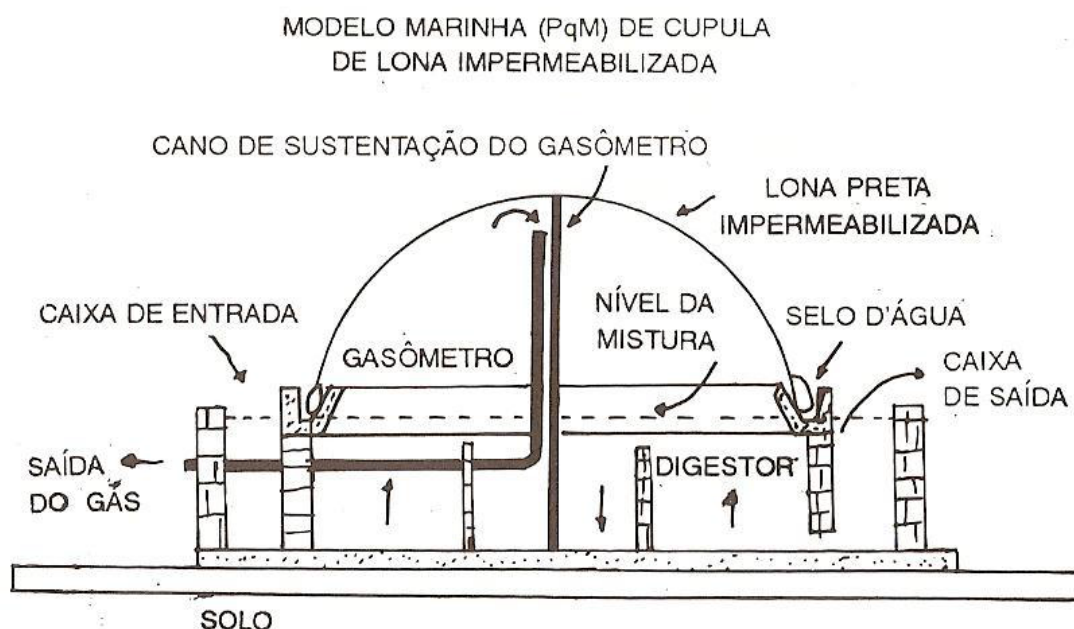


Figura 3.6 – Representação em corte de um biodigestor modelo Marinha (NOGUEIRA, 2008).

3.1.4 Tipos de Biodigestores

3.1.4.1 Batelada

Nesse sistema a matéria-prima é colocada no biorreator fechado, totalmente sem ar, para que seja realizada a fermentação anaeróbica. O gás produzido é armazenado no próprio recipiente que serve de digestor ou em um gasômetro acoplado a ele. Terminando a produção de biogás, o digestor é aberto, retirando finalmente seus resíduos. Após a sua limpeza, é colocada nova quantidade de substrato, reiniciando o processo (Comastri Filho, 1981).

3.1.4.2 Contínuo

Nos biodigestores contínuos a matéria-prima é colocada continuamente e quase sempre diretamente, utilizando matéria-prima que possua decomposição relativamente fácil e que tenha boa disponibilidade por perto, sendo que a falta da mesma provoca parada no sistema. Sendo assim, a produção de biogás e biofertilizantes ocorrem de forma contínua, ou

seja, nunca cessam. Existem vários modelos de digestores contínuos, dependendo do seu formato, mas de modo geral se dividem de acordo com seu posicionamento sobre o solo: vertical ou horizontal. Os biodigestores Chinês, Indiano e Canadense são do tipo contínuo, assim como muitos reatores caseiros (Comastri Filho, 1981).

3.1.4.2.1 Contínuo vertical

O digestor contínuo vertical é um tanque cilíndrico, feito em alvenaria (tijolo, concreto ou outros materiais disponíveis), quase sempre com a maior parte submersa no solo. Nele a matéria-prima é colocada na parte de baixo com saída do gás na parte de cima do biodigestor. É necessário cuidado extremo com esses biodigestores, pois em locais onde lençóis freáticos são superficiais pode ocorrer contaminação dos mesmos (Comastri Filho, 1981).

3.1.4.2.2 Contínuo horizontal

Os digestores contínuos horizontais podem ter qualquer formato, desde que a altura seja menor que comprimento e a largura, podendo ou não ser enterrada no solo. A matéria-prima é colocada periodicamente em um dos lados do digestor. Este tipo de biodigestor, por ser construído de forma horizontal e não precisar de tanta profundidade pode ser instalado em regiões de incidência de lençóis freáticos (Comastri Filho, 1981).

3.1.5 Escolha do tipo de Biodigestor

A escolha do tipo do biodigestor depende basicamente das condições locais, tipo de substrato, experiência do construtor e principalmente relação custo x benefício. Todavia, qualquer digestor construído, se for corretamente instalado e operado, produzirá biogás e biofertilizante. O biodigestor de batelada é indicado para pequenas produções de biogás, pois é abastecida uma única vez, fermentando por um período conveniente, sendo o material descarregado posteriormente utilizado como biofertilizante. Esse tipo de biodigestor, por ser extremamente simples, pode ser construído utilizando materiais simples existentes na propriedade (Denagutti, et al., 2002).

3.1.6 Equipamentos anexos

Muitos biodigestores podem apresentar aquecedores ou trocadores de calor, a necessidade do mesmo depende da quantidade de substrato e da possibilidade de ocorrer perdas de calor na superfície do biodigestor, no caso de digestores mais complexos. O aquecimento é muito importante nos processos com biodigestores contínuos, pois, dependendo do volume de substrato analisa-se o grau de aquecimento, ou seja, a diferença de

temperatura desse mesmo substrato e sua capacidade de ser aquecido. Portanto, dependendo do tipo de tanque, este deve ser isolado termicamente para evitar essas possíveis perdas de calor (Deublein & Steinhauser, 2008).

3.1.7 Biodigestores no Brasil

O biodigestor mais difundido no Brasil é o modelo canadense, que é feito com manta de PVC. Ele oferece menor custo e sua instalação é bem mais fácil em relação aos modelos antigos, podendo ser usado tanto em pequenas como em grandes propriedades. O desenvolvimento de biodigestores no mercado tem sido possibilitado devido ao setor privado aliado às Universidades e os Centro de Pesquisas, que muito tem incentivado neste sentido, em conformidade com o Manual de treinamento de biodigestão (2008).

A utilização do biogás no Brasil tem sido atualmente limitada pela falta de tecnologias apropriadas para seu uso, pois boa parte dos equipamentos são adaptações a partir de equipamentos dimensionados para uso do Gás Liquefeito de Petróleo (GLP), entre outros (Silva, *et al.*, 2005).

3.2 Matriz energética ou Fontes energéticas

3.2.1 Definição

A matriz energética representa a ofertar de energia disponível em cada país, como por exemplo: os combustíveis fósseis e atualmente biomassa como fonte de energias renováveis. A análise das mesmas é de grande importância para o planejamento do setor que tem com objetivo garantir a produção e seu uso adequado, permitindo, inclusive, as projeções futuras (Goldenberger *et al.*, 2008).

3.2.2 Energia não renovável e renovável

O combustível fóssil, fonte de energia não renovável, representa 85% do consumo mundial de energia e esse consumo vem crescendo a cada ano. Essa é uma situação que não pode continuar por muito tempo, devido não apenas à escassez gradativa das reservas de combustíveis fósseis, mas também pelos danos causados ao meio ambiente resultantes do seu uso, destacando-se entre eles, principalmente o aquecimento global. Além disso, os preços do petróleo e seus derivados atingiram recordes históricos. Mesmo que mantendo o crescimento econômico mundial, não há perspectivas, de que os preços dos mesmos declinem sensivelmente nos próximos anos (Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis., 2012).

Ultimamente muitos países buscam obter uma abrangência quanto a matriz energética, pois por meio de pesquisas concluíram que se depender de uma só fonte de energia pode sofrer escassez no abastecimento futuro ou enfrentar crises econômicas que venham desestabilizar completamente o setor. Dentre as várias fontes renováveis, a biomassa é considerada uma das mais promissoras em comparação às demais, onde as crescentes explorações dos recursos naturais estão diretamente relacionadas ao desenvolvimento das nações. Assim, com o tempo, os países que dispuserem de tecnologias para conversão dessas fontes terão capacidade de se tornar auto-sustentáveis em questões energéticas (Goldenberg, *et al.*, 2008.).

O consumo excessivo das energias não renováveis tem sido um assunto bastante discutido, principalmente pelo uso exagerado que contribui com o desmatamento, degradação do solo e principalmente com a poluição. Várias consequências provocadas por essas fontes são bem conhecidas pela humanidade, bem como as alterações climáticas e o conseqüente aquecimento global do planeta, contribuindo para o efeito estufa que tem como o metano (CH₄) e o dióxido de carbono (CO₂), seus principais vilões (Goldenberg *et al.*, 2008).

Há algum tempo atrás, num passado não muito remoto, não havia grande preocupação por parte de líderes mundiais com as fontes de energia convencionais, pois estas eram acessíveis e abundantes e também não existia grande preocupação por parte dos mesmos em relação à poluição, visto que há pouco tempo esse fato tem se tornado alarmante (Cortez *et al.*, 2008).

Em contrapartida houve uma mudança acentuada a partir da década de 1970, onde foi deflagrada a crise do petróleo. Nessa época, nações árabes, principais produtores de petróleo, resolveram usar seus produtos como arma econômica, deixando claro para os exportadores que o aumento do preço não dependia apenas do esgotamento do mesmo, mas também da vontade de seus produtores de vender (Goldenberg *et al.*, 2008).

De acordo com Lucas Junior *apud* Silva (2006), nas décadas de 1970 e 1980 houve um elevado preço da energia internacional decorrente da situação do petróleo na época. Com as incertezas de abastecimento de energia muitos países buscaram estratégias de racionamento e desenvolvimento de fontes alternativas, para garantir as necessidades básicas de consumo. Evidentemente, as grandes guerras foram geradas principalmente na busca de dominar áreas produtoras dessas fontes. Diante disso, qualquer questão energética tornava-se extremamente preocupante e ameaçadora para qualquer governo.

3.2.2.1 Energia não renovável e renovável no Brasil e no mundo

O Brasil pode ser considerado um país privilegiado e com muitas vantagens para dominar o vasto mercado de energia renovável, tornando-se assim auto-sustentável nesse setor, pois possui uma grande disponibilidade de áreas livres sem competir com o setor alimentício, uma grande quantidade de matéria orgânica disponível que pode ser usada como substrato. Vantagens essas que muitos outros países não possuem. No Brasil, em 2007, cerca de 47% da Oferta Interna de Energia (OIE), tem origem em fontes renováveis, enquanto que no mundo essa taxa é de 14% e nos países membros da Organização para a Cooperação Econômica e Desenvolvimento (OECD) é de apenas 6,7%. Desta participação da energia renovável, 15,9% correspondem aos produtos originados da cana-de-açúcar – bagaço de cana para fins térmicos e geração de eletricidade, além do melaço e caldo utilizados para produção de etanol – e 15% correspondem à geração hidráulica (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2013).

Apesar de o Brasil obter a maior oferta de energia proveniente de fontes renováveis, por razões variadas, o governo brasileiro não tem investido o esperado em planejamento energético, devido a grande necessidade de um grande incentivo por parte do próprio governo, novas tecnologias requerem um investimento maior. Quando existiram tais investimentos só eram analisados quando o país passava por crises, principalmente em épocas de apagões, onde resolvidas tais crises, o estudo era praticamente esquecido. Dessa maneira, o planejamento é de suma importância para o país, não apenas em casos emergentes, levando em conta a alta disponibilidade de biomassa existente e não utilizada (GOLDEMBERG et al., 2010).

O Brasil tem um vasto campo de fontes de energia, onde é necessária uma análise profunda de cada uma delas para conhecer suas reais disponibilidades, utilização e melhor opção. Dessa forma, baseado em tais resultados, incentivar o uso das mesmas. Os estudiosos ressaltam ainda, que o país tem apenas um único instrumento para verificar o consumo de energia, o Balanço Energético Nacional (BEN), seus dados são publicados no Ministério de Minas e Energia (MME) anualmente. O Balanço Energético Nacional (BEN) apresenta, para cada ano, um quadro-síntese dos fluxos de todas as modalidades de energia, dando uma visão abrangente da origem (nacional ou importado) das fontes, das transformações das fontes de energia disponíveis na natureza (petróleo, hidráulica, carvão, urânio, madeira, cana-de-açúcar etc.) e as modalidades de uso final (eletricidade, gasolina, diesel, querosene, carvão vegetal, álcool etc.), segundo as principais classes de consumo (Hollanda & Erber, 2005).

Apesar de todo o contexto analisado pelo BEN, tal análise não tem sido suficiente para um planejamento coerente, pois suas informações não explicam as finalidades do uso das

energias. Sendo assim, as formas de energia, podem ser divididas em: primária, secundária, final e energia útil, onde a expressão energia útil designa as poucas finalidades – calor/frio, luz, movimento e efeito eletro-químico – nas quais as energias finais são efetivamente aproveitadas pelos consumidores, para obter bens e serviços, (Steinhauser, 2008).

Segundo *Fernanda B. Müller, do Carbono Brasil., 2013*, o Brasil é um dos destaques do relatório sobre o panorama mundial da matriz energética. O país deve se manter como possuidor de um dos setores de energia menos intensivos em carbono no mundo, apesar das perspectivas de um aumento de 80% no uso de energia até 2035 e de se tornar um dos principais produtores de petróleo.

De acordo com esta publicação, em 2035 a produção de petróleo no Brasil vai triplicar, chegando a seis milhões de barris por dia, o que corresponde a um terço do crescimento líquido previsto para a produção mundial de petróleo. O país também deve quase duplicar a geração de energias renováveis, mantendo a fatia de 47% na matriz energética nacional, especialmente a partir das usinas hidrelétricas e eólicas.

3.3 Biomassa

Todas as plantas e animais do sistema ecológico pertencem à biomassa. Além disso, nutrientes, dejetos e bio-resíduos são considerados biomassa. Apesar da biomassa ser rica em carbono a mesma não é considerada um fóssil. O termo biomassa se refere a um vasto campo de materiais, com variadas e infinitas finalidades, podendo ser utilizada como combustível ou até mesmo como matéria prima. Como apresentado na figura 3.7 a biomassa pode ser obtida de vegetais não-lenhosos, de 28 vegetais lenhosos, como é o caso da madeira e seus resíduos, e também de resíduos orgânicos, nos quais encontramos os resíduos agrícolas, urbanos e industriais. Assim como também se pode obter biomassa dos biofluidos, como os óleos vegetais, por exemplo, mamona e soja. A utilização da biomassa, como fonte de matriz energética, por países que aderiram a tal tecnologia, tem sido reconhecida como precursora de um ato estratégico para o futuro, pois trata-se de uma fonte renovável com baixo custo, com aproveitamentos dos resíduos que ainda podem ser utilizados como biofertilizantes, sem contar seu potencial menos poluente em relação às fontes convencionais. (Cortez, *et al.*, 2008).

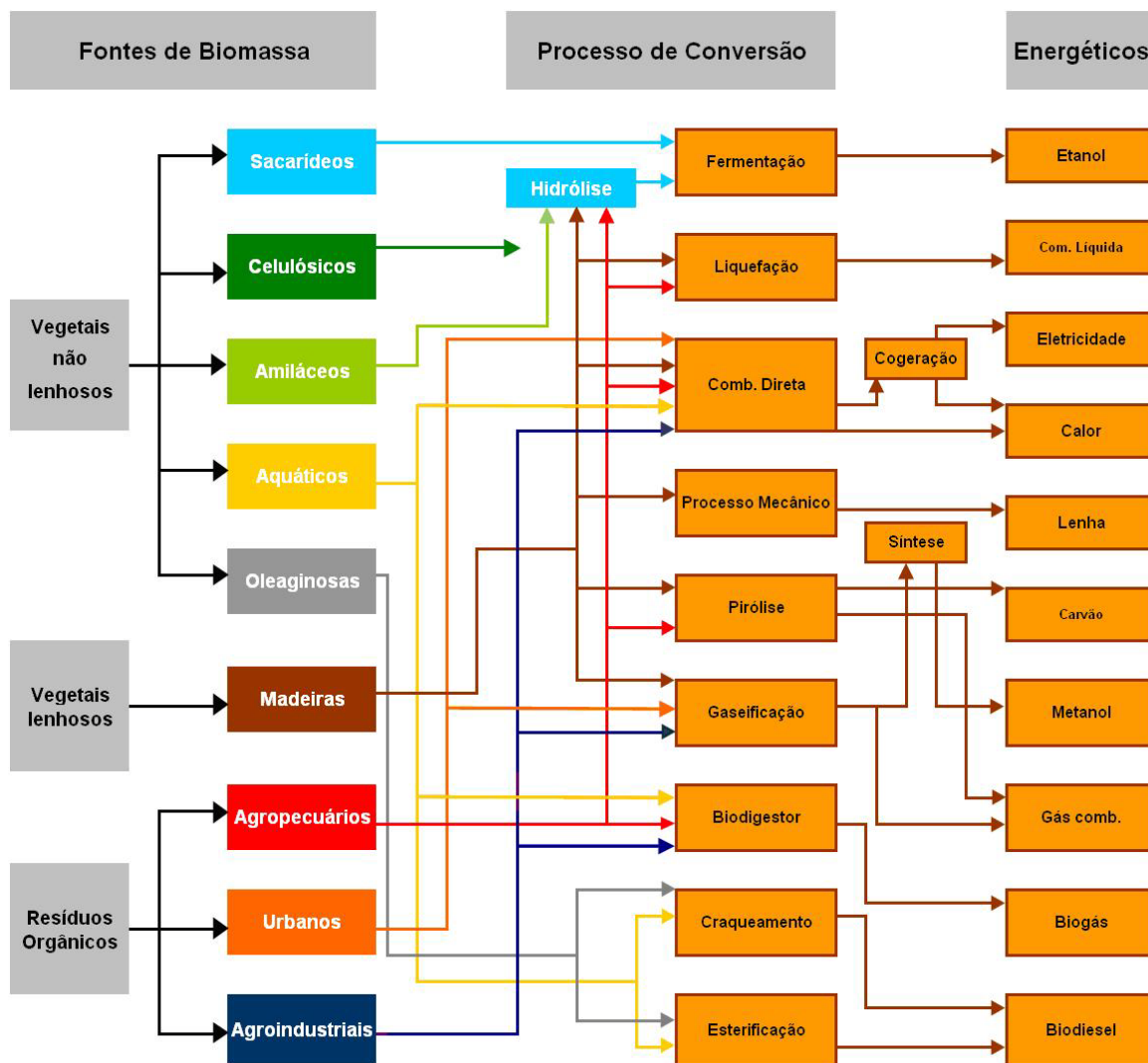


Figura 3.7. Fluxograma das fontes de biomassa, processos de conversão e energéticos produzidos (Balanço Energético Nacional - BEN. Brasília: MME, 1982 - adaptado por CENBIO), ANEEL (1982).

3.4 Biogás

Através da conversão de biomassa em energéticos pode-se obter o biogás que é uma mistura gasosa produzida a partir da decomposição anaeróbia de materiais orgânicos, composto de 55-70% de metano (CH_4) e 30-45% dióxido de carbono (CO_2), com pequenas quantidades de ácido sulfídrico (H_2S) e amônia (NH_3), traços de hidrogênio (H), nitrogênio (N), monóxido de carbono (CO), carboidratos e oxigênio (O) (Deublein & Steinhäuser, 2008).

Segundo Oliver *et al.* (2008), o biogás é um gás combustível e renovável, sendo que sua queima ocorre de forma limpa e tem sido usado como combustível e fonte de energia

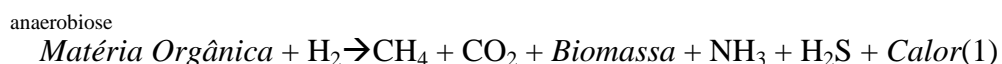
alternativa. Seu poder calorífico varia de 5000 a 7000 Kcal/m³. Pode-se comparar a relação de 1m³ de biogás com outras fontes de energia (Tabela 3.1).

Tabela 3.1. Relação para 1litro de biogás com outras fontes de energia (Oliver et al., 2008, p. 12)

0,61 litros gasolina	0,45 litros de gás de cozinha
0,58 litros de querosene	1,5 quilos de lenha
0,55 litros óleo diesel	0,79 litros de álcool hidratado

3.4.1 Processo anaeróbio

O processo de digestão anaeróbia envolve a degradação e estabilização da matéria orgânica levando à formação de metano, produtos inorgânicos (dióxido de carbono) e biofertilizante (matéria orgânica estabilizada). A representação da digestão anaeróbia pode ser feita pela equação (1).(KELLEHER et al., 2002)



A digestão anaeróbia é uma fermentação simples que ocorre em um único tanque, como uma fossa ou lagoa anaeróbia.

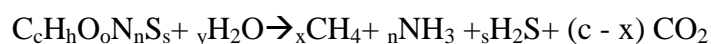
A degradação anaeróbia da matéria orgânica a metano é um processo biológico que ocorre em diferentes fases, sendo processado por diferentes tipos de microorganismos que agem simbioticamente (KELLEHER et al., 2002). Isso torna necessária a representação do processo anaeróbio incluindo outras populações de bactérias intermediárias.

Essas bactérias ou microorganismos são os hidrolíticos, acidogênicos, acetogênicos e metanogênicos(GARCIA et al., 2000).

As bactérias acidogênicas e as arqueas metanogênicas apresentam características diferentes, principalmente em relação às exigências nutricionais, a fisiologia, o pH, o crescimento e a sensibilidade quanto a variações de temperatura (CHERNICHARO, 1997). Em relação à velocidade de reprodução, quando comparadas às bactérias acidogênicas, as arqueas metanogênicas apresentam menor velocidade além de serem mais sensíveis às condições adversas ou alterações das condições ambientes (SOUZA, 1984).

3.4.2 Formação do biogás

A formação do metano ocorre de forma espontânea, quando a biomassa ou matéria orgânica (substrato) composta de carboidratos, lipídeos, proteínas entre outros nutrientes, em ambientes isentos de ar e com umidade, ainda na presença de bactérias, se decompõem formando metano e impurezas. O enxofre (S) fica no resíduo e uma parte do dióxido de carbono se liga a amônia, o resultado em geral é uma composição do biogás de CH₄ : CO₂ : 71% : 29%”. A formação do biogás a partir da biomassa resulta, em geral, da equação:



O processo aeróbio passa necessariamente por quatro fases sendo elas hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese, onde a geração do biogás ocorre na ultima etapa do processo, como mostrado na figura 3.8. Durante o processo de produção, é indispensável que as reações químicas ocorram de forma sinérgica, sendo que as fases 1-2 e 3-4 possuem uma relação íntima, logo as mesmas são organizadas em dois estágios (I e II), em que os níveis de degradação devem ter o mesmo tamanho (Deublein & Steinhäuser, 2008).

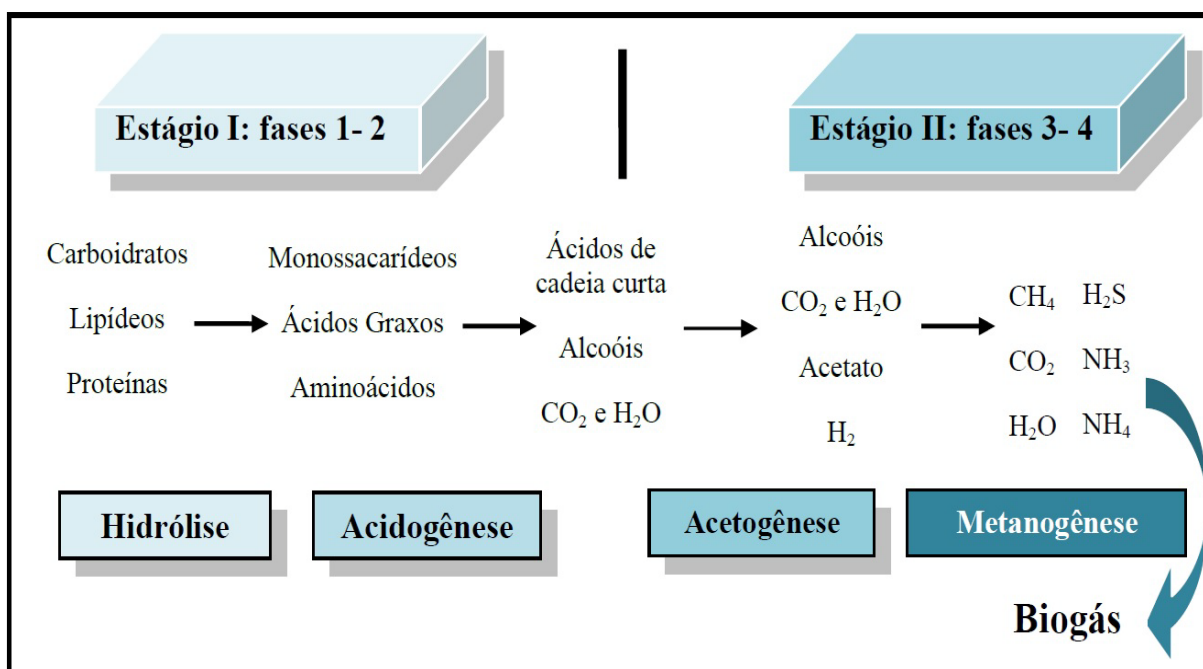


Figura 3.8. Etapas e fases de produção do biogás: etapa I (fase de hidrólise e acidogênese) e etapa II (fase de acetogênese e metanogênese).

3.4.3.1 Hidrólise

A hidrólise cataboliza macromoléculas como proteínas, lipídeos e carboidratos, que são degradados em moléculas menores solúveis por enzimas de bactérias anaeróbicas facultativas. Os carboidratos geralmente demoram poucas horas para se decompor ao contrário das proteínas e lipídeos que levam dias.

As bactérias que aparecem nessa fase são responsáveis pela solubilização da matéria orgânica, e isso ocorre com a quebra dos polímeros transformando-os em compostos menores, monômeros simples (Filho, 1981; Metcalf, 2003). Com a quebra das cadeias, as proteínas dão origem aos aminoácidos, os carboidratos complexos formam monômeros de açúcar e as gorduras, os ácidos graxos de cadeia longa. A velocidade dessas reações depende da superfície de contato entre o substrato e as enzimas liberadas pelas bactérias que as catalisam, podendo ser citadas a amilase, celulase, protease e lipase (Vitoratto & Metcalf, 2003).

Em reatores anaeróbios podem ser encontrados os organismos *Clostridium*sp, *Peptococcusanaerobus*, *Bifidobacterium*sp, *Desulphovibriosp*, *Corynebacterium*sp., *Lactobacillus*, *Actinomyces*, *Staphylococcus*, e *Escherichia coli*, que são bactérias anaeróbias facultativas ou obrigatórias, responsáveis pela hidrólise e fermentação (Metcalf, 2003).

Após a hidrólise, as bactérias atuam na fermentação dos produtos obtidos, havendo a formação de compostos orgânicos de moléculas menores, como o ácido fórmico, acético, propiônico, butírico, valérico, láctico, etanol, amônia e gás carbônico e hidrogênio. Esta fase é limitante da velocidade do processo global quando o resíduo é predominantemente constituído de matéria orgânica não dissolvida como proteínas, gorduras e celulose.

3.4.3.2 Acidogênese

Os produtos da fase hidrolítica são usados como substratos para a fase acidogênica. Durante o período de fermentação os hidrogênios podem formar intermediários que prejudicam a fermentação por inibição de bactérias acetogênicas importantes para próxima fase. Sendo assim, quanto maior a pressão de hidrogênio menor será a formação de acetato.

3.4.3.3 Acetogênese

Nessa fase há a produção de acetato e hidrogênio através do metabolismo das substâncias produzidas pelas bactérias hidrolíticas fermentativas, equações (2) e (3). Nessa etapa, alguns produtos da fase anterior como o etanol, propionato, butirato, valerato e lactato, em baixa pressão do gás hidrogênio, são oxidados a acetato, havendo a formação de dióxido

de carbono e hidrogênio (SOUZA, 1984; METCALF, 2003). Os produtos gerados pelas bactérias acetogênicas são apropriados para as arqueas metanogênicas (METCALF, 2003).



3.4.3.4 Metanogênese

A fase de produção do metano (CH₄) deve estar extremamente isenta de ar, pois as bactérias dessa fase são anaeróbias restritas. As mesmas produzem metano a partir de duas fontes principais, ou seja, produzem CH₄ a partir do acetato ou da combinação CO₂ e H₂.

Como a matéria orgânica descartada no RU apresenta alta concentração de enxofre pode ocorrer o aparecimento das bactérias sulfetogênicas durante o processo de digestão. Essas bactérias competem com as metanogênicas pelo mesmo substrato, mas produzem como subproduto o gás sulfídrico (Metcalf, 2003). Então, deve-se ter cuidado com essas bactérias, pois a concentração de metano na mistura gasosa diminuirá drasticamente comprometendo o rendimento da geração de energia elétrica através da queima do gás, além do que a alta concentração do gás sulfídrico provocará o desgaste precoce dos equipamentos, principalmente dos geradores.

3.5 Fatores que influenciam na digestão anaeróbia

O processo de digestão anaeróbia pode ser seriamente afetado por fatores que estão relacionados com o substrato, com as características do digestor ou com as condições de operação. Mais detalhes sobre esses fatores serão apresentados a seguir.

3.5.1 Quantidade de matéria seca (MS)

Para que a produção de metano ocorra de forma satisfatória é necessário que a concentração de matéria seca seja de 7 a 9%, isto é, a cada 100,0 litros de biomassa deve haver uma média de 8,0 kg de MS, para digestores contínuos (Mazzucchi, 1980; Filho, 1981). Já, para digestor tipo batelada a concentração de matéria seca pode chegar a 25,0% de MS, ou seja, 25,0 kg de MS para cada 100,0 litros de biomassa (Mazzucchi, 1980). O digestor contínuo recebe carga de efluente continuamente, ou periodicamente, sem que ocorra a paralisação do processo de biodigestão e produção de biogás, havendo também produção contínua de efluente. Já, em digestor tipo batelada uma nova carga de afluente só é realizada quando o

processo de biodigestão chega ao fim (mínima produção de biogás), e para que isso ocorra é preciso que a câmara de digestão seja esgotada.

3.5.2 Concentração de nutrientes

A presença de alguns macro elementos como o carbono, nitrogênio, potássio, fósforo e enxofre, alguns micronutrientes minerais, vitaminas e aminoácidos são necessários para o desenvolvimento das arqueas metanogênicas, sendo assim, o conhecimento da composição química e o tipo de biomassa utilizada são importantes. Se for necessário, pode ser feita a dosagem de nutrientes e ativadores químicos para que ocorra uma boa fermentação da biomassa (FILHO, 1981).

3.5.3 pH – Acidez ou Alcalinidade

O pH é um índice da acidez ou alcalinidade da mistura no interior do biodigestor e que pode ser medido com a utilização de pH-metro (Mazzucchi, 1980).

Em digestores, a faixa de operação está entre pH 6,0 a 8,0, sendo que o ponto ideal encontra-se em pH 7,0 (Mazzucchi, 1980; Filho, 1981). Valores abaixo dessa faixa determinam a queda de produção do biogás, podendo chegar à paralisação quando o pH atinge valores inferiores a 6,0 (Mazzucchi, 1980; Parchen, 1979).

Segundo Vitoratto, para a conversão de proteínas a aminoácidos, a faixa de operação ótima do biodigestor se encontra entre pH 7,0 e 7,5, ao passo que para a conversão de aminoácidos a ácidos o valor ótimo do pH é de aproximadamente 6,3. Para bactérias acidogênicas o pH ótimo se encontra na faixa de 5,5 a 6,0 enquanto que para arqueas metanogênicas a faixa de pH ótimo se encontra entre 6,8 a 7,2. Caso a taxa de hidrólise seja mais alta que a taxa metanogênica e a alcalinidade não seja suficientemente elevada, pode ocorrer o acúmulo de ácidos graxos voláteis (AGV) e de hidrogênio, levando à acidificação do reator, o que conduzirá à parada do processo (Souza, 1984; Metcalf, 2003).

No tratamento de resíduos orgânicos, a alcalinidade é gerada, principalmente, pela mineralização das proteínas em amônia, que posteriormente se associará ao ácido carbônico formando bicarbonato de amônia como solução tampão (Massé & Masse, 2001).

Durante o funcionamento de um biodigestor pode haver a necessidade de correção tanto da acidez quanto da alcalinidade do meio. Para maior alcalinidade recomenda-se a utilização de cal, carbonato de sódio (Na_2CO_3), soda cáustica (NaOH), bicarbonato de sódio (NaHCO_3) ou bicarbonato de potássio (KHCO_3). Para maior acidez recomenda-se o emprego de ácido acético (CH_3COOH), acetato de sódio (CH_3COONa), ácido carbônico (H_2CO_3), amoníaco (NH_3) ou cloreto de amônio (NH_4Cl).

3.5.4 Temperatura interna do biodigestor

O processo de fermentação é influenciado diretamente pela temperatura, agilizando-o e, conseqüentemente, diminuindo o tempo de retenção da massa no interior do biodigestor além do que a porcentagem de metano na constituição do biogás é maior quando o processo de fermentação ocorre em temperaturas mais elevadas, garantindo dessa forma um maior poder calorífico à mistura. Assim, com o funcionamento na faixa de temperatura adequada, o biodigestor poderá ter seu volume diminuído pela metade ou menos para o mesmo volume de gás produzido, representando economia de material na construção, ou caso seja desejável, apresentar uma maior produção de gás com um volume preestabelecido (MASSÉ; MASSE, 2001).

Em um processo anaeróbio, o mais importante é manter uma temperatura constante dentro do reator, devido, principalmente, ao fato de que as arqueas metanogênicas são mais sensíveis a variações bruscas de temperatura (Barrera, 2003; Souza, 1984), apesar da formação de metano poder ocorrer em condições extremas, como 0 a 97 °C (Chernicharo, 1997).

As arqueas metanogênicas podem ser divididas em dois grupos, as mesofílicas, que operam em temperaturas situadas na faixa de 20 a 40 °C, e as termofílicas, que operam na faixa de 50 a 60 °C (Sousa, 1984; Chernicharo, 1997). Quando a temperatura de operação está em torno de 35 e 37°C o processo de digestão e gaseificação é altamente acelerado (Sousa, 1984; Chernicharo, 1997). Para temperaturas inferiores a 35 °C o processo de digestão é menor e, para temperaturas inferiores a 15 °C, a produção é muito reduzida, podendo ser cessada (Mazzucchi, 1980; Barrera, 2003).

Para Massé e Masse, (2001) um aumento na concentração de metano no biogás produzido pode ocorrer com elevação da temperatura.

Como se sabe, ao trabalharem na biodigestão, as bactérias também produzem o calor necessário para a sua manutenção então, o interessante é apenas impedir que variações climáticas externas bruscas interfiram na temperatura interior (BARRERA, 2003). Portanto, pelo fato das arqueas metanogênicas serem sensíveis a variações de temperatura e, procurando manter a temperatura a mais próxima possível de 35 °C, garantindo assim um processo de digestão e gaseificação aceleradas com alto teor na concentração de metano, é uma boa prática construir o digestor em sua totalidade ou maior parte enterrada no solo.

3.5.5 Tempo de detenção hidráulica (TDH)

Tempo de detenção hidráulica ou período de detenção hidráulica é o tempo que o material permanece no interior do biodigestor, ou seja, tempo entre a entrada do efluente e a

saída do afluyente do digestor. De acordo com os diferentes substratos (biomassa) utilizados para a alimentação do biodigestor, e dos demais fatores, o tempo de retenção varia de 4 a 60 dias (Mazzucchi, 1980; Filho, 1981). Para o substrato composto de resíduos de matéria orgânica o tempo de detenção situa na faixa de 20 a 30 dias, sendo que com 30 dias a carga orgânica já sofreu grande redução e devido a isso, a produção de biogás já atingiu seu máximo e a partir desse ponto passa a decair (Beux, 2005).

3.5.6 Concentração de sólidos voláteis (SV)

Os sólidos voláteis são fermentados para produzir o biogás, daí a importância e necessidade de saber qual a concentração dos mesmos, se possível. Quanto maior a concentração de sólidos voláteis na biomassa, maior será a produção de gás, lembrando que isso também dependerá da eficiência do sistema digestor (Pinto, 2000).

3.5.7 Presença de substâncias tóxicas

Deve-se tomar cuidado com o material que entra no digestor para que o mesmo não possua nutrientes em excesso, desinfetantes fortes, bactericidas, combustíveis derivados de petróleo entre outros elementos que possam contaminar o substrato e ser fatal para as bactérias envolvidas no processo biológico de formação do gás. Por esse fato, em abatedouros ou frigoríficos, a água de lavagem de utensílios, de dependências (linha de produção, cozinha e refeitório, banheiros e vestiários) e de lavagem de caminhões não deve ser introduzida no digestor, pois contém elevada carga de detergentes, desinfetantes e derivados de petróleo (Parchen, 1979; Silveira, 1981).

3.5.8 Relação carbono/nitrogênio

É outro parâmetro que está diretamente relacionado ao desenvolvimento do processo biológico da fermentação. Para uma digestão ótima, é necessário que esta relação se situe entre 20 a 30:1, ou seja, de 20 a 30 partes de carbono para uma parte de nitrogênio (Filho, 1981).

3.6 Fertilizante

Adubo ou fertilizante é um produto natural ou químico, este último feito pela indústria, que contém um ou mais dos nutrientes que as plantas necessitam para sua sobrevivência. Os adubos, na maioria das vezes são capazes de quadruplicar a produção de uma cultura, no entanto para o agricultor não é suficiente que o adubo apenas aumente a produção, mas é importante também que o seu lucro seja aumentado. O nitrogênio é o elemento que a planta necessita em maior quantidade. As raízes absorvem o nitrogênio do

solo sob a forma de nitrato, como ressalta o próprio autor, o nitrogênio orgânico se transforma em nitrato através de um processo chamado mineralização. O nitrogênio dá cor verde as plantas, acelera o seu crescimento, aumenta a quantidade de folhas, melhora a qualidade das hortaliças comestíveis, aumenta o teor de proteínas de plantas alimentícias, alimenta os microrganismos do solo que decompõem a matéria orgânica (MALAVOLTA, 1979).

3.6.1 Tipos de fertilizantes

Malavolta (1979) classifica os fertilizantes em:

- ❖ **Fertilizante simples:** formados por compostos químicos, com um ou dois macro nutrientes primários, entre eles nitrogênio (N), fósforo (P) e potássio (K) e alguns macro nutrientes secundários como o cálcio (Ca), magnésio (Mg) e o enxofre (S).
- ❖ **Fertilizante misto:** resultante da mistura de dois ou mais fertilizantes simples.
- ❖ **Fertilizante complexo:** contem dois ou mais macro nutrientes primários resultantes do processo tecnológico, formando dois ou mais compostos químicos.

3.6.2 Principais adubos nitrogenados

Segundo Malavolta (1979), a amônia é o ponto de partida para a fabricação da maioria dos nitrogenados e através da mesma é possível produzir adubos como:

❖ **Nitrocálcio**

Mistura de nitrato de amônia (NH_4NO_3) e calcário dolomítico [$\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ ou CaCO_3 , MgCO_3], ou seja, calcário com alto teor de magnésio.

❖ **Salitre do Chile (NaNO_3)**

É extraído do caliche, material este rico em nitratos, facilmente encontrado em algumas regiões do Chile. Pode ser encontrado na forma de Laurato branco ou cristalino, com 15% de nitrogênio e com grande quantidade de micronutrientes essenciais às plantas e na forma de Champion branco ou granulado com 16% de nitrogênio. Os dois tipos são solúveis em água e possui boa absorção pelas plantas.

❖ **Sulfato de amônio ($\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$**

Possui cerca de 20% de nitrogênio solúvel em água. É obtido na destilação seca do carvão, onde sem contado com o ar produz amônia (NH_3), a qual reage com ácido sulfúrico (H_2SO_4) e produz o sulfato de amônio. Este adubo é muito interessante para o agricultor, pois apresenta grande concentração de enxofre (S), pois é notada a falta deste mesmo elemento em solo brasileiro.

❖ *Uréia ($(NH_2)_2CO$)*

É um produto sintético, geralmente granulado de cor branca, dependendo do tipo de fabricação. Contém 45% de nitrogênio e é utilizado em pulverização em frutíferas e hortaliças, apresentando excelentes resultados.

❖ *Amônia anidra*

É um gás liquefeito e comprimido que apresenta 82% de nitrogênio, tido como o adubo nitrogenado com maior concentração deste mesmo elemento.

❖ *Nitrossulfocálcio ($NH_4NO_3CaSO_4$)*

Produto sintético fabricado com tecnologia brasileira com 27% de nitrogênio e ainda possui a vantagem de possuir enxofre (4%) e cálcio (8%) em sua concentração.

É melhor dar preferência as formas amoniacais, como o sulfato de amônia ou as formas amídicas, como a uréia (Malavolta, 1979).

3.7 Biofertilizante

3.7.1 Definição

O biofertilizante é popularmente conhecido como resíduo proveniente do biodigestor, resíduo este muito bem aproveitado na agricultura, ou seja, é produzido após o processo anaeróbico paralelamente à produção de biogás e é um adubo orgânico (Tabela 3.2), como tantos outros. Eles podem apresentar valores elevados de nutrientes, sendo que o mesmo pode conter teores médios de 1,5 a 2,0% de nitrogênio (N), de 1,0 a 1,5% de fósforo (P) e de 0,5 a 1,0 % 41 de potássio (K). Esse adubo não possui agentes causadores de praga ou doenças e age de forma eficaz para repor os teores de nutrientes antes escassos no solo (OLIVER, 2008).

Principais adubos orgânicos	
Origem	Adubo
Vegetal	Restos de culturas Adubos verdes Tortas de oleaginosas Torta de filtro Vinhaça
Animal	Sangue dessecado Farinha de carne Couro moído Farinha de cascos e chifre Restos de peixes
Mista	Estercos Compostos Lixo Resíduos de esgoto

Tabela 3.2 – Principais adubos orgânicos (Oliver, 2008).

3.7.2 Principais características do biofertilizante

Segundo Oliver *et al* (2008), o biofertilizante como qualquer outro composto possui característica específica como pH (potencial de hidrogênio) em torno de 7,5. Sendo assim, funciona como corretivo de acidez, liberando o fósforo e outros nutrientes para solução do solo. Além disso, o aumento do pH dificulta a multiplicação de fungos patogênicos às culturas, proporcionando grandes melhorias para o solo já que:

- ❖ os nutrientes do biofertilizante são fáceis de ser absorvido pelo solo e aproveitado na alimentação das plantas;
- ❖ a qualidade e estrutura do solo são melhoradas, e assim as plantas têm mais facilidades de se desenvolver;
- ❖ o solo fica mais resistente a erosão, graças ao melhoramento da agregação das partículas;
- ❖ o biofertilizante aumenta a penetração de ar pelos poros do solo facilitando assim a respiração das raízes;
- ❖ solos degradados melhoram, já que o mesmo favorece a proliferação de bactérias;
- ❖ a lavoura tem sua produtividade melhorada;
- ❖ o biofertilizante pode estar estável se o biodigestor for manuseado de forma correto, podendo então estar fora de perigo de contaminar o meio ambiente, não vai haver proliferação de moscas e insetos e sem odor desagradável;

- ❖ o mesmo ainda serve de controle de plantas daninhas, não permitindo seu crescimento na lavoura;
- ❖ e por fim diminui o risco de contaminação por coliformes fecais presente no esterco, pois eles são eliminados na fermentação anaeróbica.

3.7.3 Formas de aplicação e efeitos do biofertilizante

Na agricultura pode ser aplicado diretamente no solo em forma líquida ou seca, sendo que para aplicação direta nas plantas, coloca-se 1 litro de biofertilizante para cada 10 litros de água, passa-se a mistura por uma peneira fina e realiza-se a aplicação (Oliver, 2008).

3.7.4 Importância da adubação

O solo consiste de sólidos, de líquido e de uma mistura de gases, numa proporção de 50, 15 e 25% respectivamente. A fase sólida, constituída pelas frações minerais e orgânicas do solo, é o reservatório de nutrientes para as plantas e regula a concentração dos elementos na solução (Oliver *et al.*, 2008). Sendo assim, as plantas necessitam de nutrientes indispensáveis para seu desenvolvimento os quais podem ser fornecidos pelo solo, entre eles existem o nitrogênio, fósforo e potássio. Estes mesmos elementos são partes integrantes da parte mineral e orgânica da terra. Além destes elementos, as plantas exigem ainda grandes quantidades de cálcio, magnésio e enxofre, e numa quantidade menor boro, cloro, cobre, ferro, manganês, molibdênio e zinco. Em um ambiente natural, tipo matas virgens, acontece um ciclo no qual os elementos que são utilizados, eles voltam de alguma forma, seja na morte de plantas ou em sua decomposição (Malavolta, 1979).

3.8 Inoculação

O sistema anaeróbio não é verificado imediatamente após a inserção dos resíduos no reator. Há necessidade de um tempo de detenção, muitas vezes elevado, para que os microrganismos possam crescer e levar o sistema a um ponto de equilíbrio. O uso de inóculo pode ser importante, tanto nos estudos sobre digestão anaeróbia quanto no ponto de partida de reatores (Souto, 2005).

O uso de inóculo na digestão anaeróbia da matéria orgânica é uma estratégia que combina o tratamento de diferentes resíduos com características complementares. Alguns estudos têm sido desenvolvidos nessa área, principalmente a inoculação com efluentes tratados e combinados para uma melhor eficiência dos resultados, levando-se em consideração a disponibilidade de matéria disponível.

A utilização de inóculo é um processo de tratamento conjunto, por meio da digestão anaeróbia, de diferentes tipos de substratos. Estes substratos compensam-se, quanto às suas características físico-químicas, mas permitem, sobretudo quando combinados, aumentar a produção de biogás, por volume de digestor ocupado.

Considerando que, no início do processo de degradação, a quantidade de ácidos e hidrogênio é maior em função da taxa de geração das bactérias formadoras de ácido, a adição de uma quantidade suficiente de organismos metanogênicos pode prevenir o desbalanceamento. Normalmente são usados como inóculos lodo de esgoto digerido, lodo de UASB, estrume, resíduo digerido e lixiviado (Pinto, 2000). Na Dinamarca, a digestão anaeróbia da FORSU é geralmente associada a inóculos como os estrumes e lodo de esgoto (Hartmann *et al.*, 2004).

Devido à grande carga orgânica biodegradável da FORSU, a principal limitação da digestão anaeróbia de resíduos está relacionada à rápida acidificação, que é responsável pela diminuição do pH no interior do reator e pela grande produção de ácidos graxos voláteis, o que inibe a atividade metanogênica (Bouallagui *et al.*, 2004a). Sendo assim, o uso de inóculo com capacidade de tamponamento é uma forma de controlar a acidez no processo de digestão anaeróbia.

A relação ótima de percentagem de inóculo a ser adicionado ao RSO para acelerar o processo de digestão até o presente momento não é bem definida. Para obter um processo balanceado, a quantidade de inóculo a ser adicionada dependerá da atividade metanogênica do inóculo e da taxa de produção inicial do substrato.

Para calcular a quantidade de inóculo utiliza-se a equação 4:

$$FI = \frac{ST_i}{ST_i + ST_s} \quad (4)$$

Onde:

FI = fator de inóculo;

ST_i = sólidos totais do inóculo;

ST_s = sólidos totais do substrato.

Verifica-se que diversos estudos têm sido realizados na área de digestão de resíduos sólidos urbanos com inóculo. Para demonstrar tal tendência, na Tabela 3.3 é apresentado um resumo dos dados de alguns sistemas experimentais investigados e disponíveis na literatura científica.

Tabela 3.3: Dados de alguns estudos sobre digestão anaeróbia de resíduos sólidos.

Referência	Resíduo	Inóculo	ST (%)	Temperatura (°C)	Td (dias)	Eficiência (%)
Cechiet <i>al.</i> (1993)	FORSU	-	20	37→55	13,5-14,5	24-34 (STV)
Mtz. Viturtiaet <i>al.</i> (1995)	Frutas e verduras	Esterco bovino e suíno	6	35	4,5-18	27-72 (STV)
Torres Castilloet <i>al.</i> (1995)	Cevada	Esterco bovino e suíno	26-30	25 e 35	110-240	45-86 (STV)
Del Borghiet <i>al.</i> (1999)	Resíduos de cozinha triturado	Lodo primário e secundário	1-4	55	12	56-63 (STV)
Pavan <i>et al.</i> (1999a)	Frutas e verduras	-	8	35-56	11-12	67-84 (STV)
Pavan <i>et al.</i> (1999b)	FORSU	-	10-25	55-56	11-12	37-82 (STV)
Leite <i>et al.</i> (2001)	FORSU	Rúmen bovino	18-19	Não informado	365	86, 81, 73, 70 (DQO)
Strootet <i>al.</i> (2001)	FORSU + lodo primário + lodo ativado descartado	Esterco bovino e lodo de digestor anaeróbio	8-21	37	4-20	43-68 (SVT)
Xuet <i>al.</i> (2002)	Alimentos	Lodo de digestor e de reator UASB	10	35	16	60 (SVT)
Mace <i>et al.</i> (2003)	FORSU	Lodo de digestor anaeróbio industrial mesofílico	11	35	8-15	43-45 (SVT)
Wang <i>et al.</i> (2003)	Alimentos	Lodo de digestor e de reator UASB	10	35	36	78 (SVT)
Bouallaguiet <i>al.</i> (2004b)	Frutas e verduras	Lodo de digestor	4, 6, 8 e 10	20, 35, 55	20	54-87 (SVT)
Fernández <i>et al.</i> (2005)	FORSU	Gordura animal e vegetal	28	37	17	73 (SVT)
Hartmann e Ahring (2005)	FORSU	Esterco bovino	25	55	14-18	69-74 (SVT)

Tabela 3.3: Dados de alguns estudos sobre digestão anaeróbia de resíduos sólidos.

Referência	Resíduo	Inóculo	ST (%)	Temperatura (°C)	Td (dias)	Eficiência (%)
Carneiro (2005)	FORSU	Lixiviado+lodo de esgoto	13	35	95	59-65 (SVT)
Foster-Carneiro <i>et al.</i> (2006)	FORSU	Esterco bovino, esterco suíno e lodo de esgoto	30	55	60	43 (SVT)
Agdag e Sponza (2007)	FORSU	Lama de esgoto industrial	32, 38 e 45%	35-40	150	83, 87 e 89 (DQO)
Capela <i>et al.</i> (2007)	FORSU	Lodo de esgoto industrial e esterco bovino	5	35	65	65 (SVT)

Verifica-se que diversas pesquisas experimentais têm sido realizadas na área de digestão anaeróbia e, no geral, são obtidos bons resultados de eficiência de remoção de matéria orgânica.

Segundo Stroot *et al.* (2001), foi constatado que, em sistemas de um estágio com alimentação semi-contínua de resíduo sólido orgânico e com elevadas taxas de carregamento, a agitação mecânica contínua foi inibitória, passando o reator a apresentar desempenho instável. Em muitos casos, a simples diminuição da agitação estabilizou o processo. Nos reatores com pouco grau de mistura, a digestão foi estável, sem acúmulo de propionato e com pouca alteração do pH, ao contrário do que ocorreu com reator semelhante operado sob agitação contínua, em que houve acúmulo de propionato e o pH oscilou entre 6-8.

De acordo com Agdag e Sponza (2007) foi avaliado que a digestão anaeróbia utilizando lodo de estação de tratamento de esgoto como inóculo. Na pesquisa, verificou-se que a concentração de ácidos voláteis orgânicos decaiu significativamente nos reatores inoculados com o lodo, resultando aumento no valor de pH quando comparado com o reator sem adição de inóculo. A produção de gás metano e a relação DBO/DQO no lixiviado foram melhores nos reatores que digeriram com o lodo, comparando com reator que digeriu apenas com FORSU.

Segundo avaliação de Pinto (2000), três diferentes tipos de inóculos no tratamento de FORSUP percolado coletado em reator de 236 L, tratando a FORSU inoculada com percolado

de aterro sanitário com oito anos de idade e tamponado com bicarbonato de sódio, mantido a $35 \pm 1^\circ \text{C}$ por dois anos; lodo granular coletado em reator anaeróbico compartimentado (2ª câmara) tratando esgoto sanitário; lodo granulado coletado em reator anaeróbico de fluxo ascendente tratando águas residuárias industriais de fábrica de papel. Observou-se que a degradação anaeróbia da FORSUP apresentou partida mais rápida e com maior potencial metanogênico quando inoculada com percolado, em comparação com os demais inóculos avaliados. A eficiência do percolado como inóculo pode ser atribuída à maior capacidade de transferência de massa entre inóculo (em fase líquida) e a FORSUP, como à adaptação do ecossistema microbiológico presente no percolado a essa fração.

Na pesquisa realizada por Flor *et al.* (2004), foi utilizado reator contínuo de 60 litros com agitação mecânica sendo alimentado por uma mistura de 25% de Lodo Biológico (LB) proveniente de Estação de Tratamento de Águas Residuárias e 75% FORSU. O tempo de detenção hidráulica foi de 30 dias. A remoção de sólidos totais voláteis ficou acima de 50% e a produção volumétrica de metano ficou em $3,1\text{m}^3 (\text{CH}_4)/\text{dia}$. Não houve inibição pelos ácidos orgânicos ou decaimento do pH.

Cintra (2003) realizou experimento que consistiu na análise comparativa entre três diferentes estratégias de operação de reatores anaeróbios tratando RSU: tratamento convencional (1), tratamento com recirculação de lixiviado bruto (2), e tratamento com recirculação do lixiviado pré-tratado em reator UASB (3). Com relação ao monitoramento dos parâmetros físico-químicos do lixiviado e do biogás das linhas distintas de tratamento, pode-se concluir que a recirculação do lixiviado promovida nas linhas 2 e 3, e a inoculação endógena com lodo biológico excedente, aplicada exclusivamente na linha 3, favoreceram consideravelmente as etapas iniciais de fermentação e acidogênese, estabelecendo a fase metanogênica

Para Souto (2005) a influência da recirculação de lixiviado na aceleração do processo de digestão anaeróbia da FORSU. A recirculação foi aumentando progressivamente na partida dos reatores que foram mantidos em sala climatizada a uma temperatura de 35°C . O conjunto era composto de um reator alimentado com a FORSU misturada a lixiviado de aterro sanitário, e um filtro anaeróbico, destinado a tratar o lixiviado. Mediram-se diversas variáveis para acompanhar o processo: DQO, alcalinidade, sólidos, nitrogênio total e amoniacal, fósforo total, ácidos voláteis e composição do biogás. Acompanhou-se, também, o desenvolvimento da microbiota anaeróbia. Por fim, concluiu-se que a taxa de recirculação variável consegue

acelerar o processo, além de alterar de forma significativa o comportamento dos reatores e a forma de interação entre os mesmos.

Seguindo uma linha similar, Bilgili *et al.* (2006) desenvolveram estudo onde o efeito da recirculação do lixiviado na digestão aeróbia e anaeróbia de RSU foi determinada por quatro reatores em escala de bancada. As opções estudadas e comparadas com o aterro sanitário tradicional foram: recirculação do lixiviado, aeração e aeração com recirculação de lixiviado. A qualidade do lixiviado foi regularmente monitorada por meio da análise do pH, alcalinidade, sólidos totais dissolvidos, condutividade, potencial de oxi-redução, cloro, DQO, amônia e nitrogênio. A opção de digestão com recirculação do lixiviado e aeração foi a mais eficiente para remover matéria orgânica e amônia. A aeração da massa de resíduos produziu uma rápida oxidação da matéria orgânica se comparada com a digestão anaeróbia tradicional. Verificou-se ainda que a recirculação foi mais eficiente na opção que utilizou degradação anaeróbia de resíduos do que na degradação aeróbia. Além disso, a qualidade do lixiviado não mostrou mudanças consideráveis nas duas operações aeróbias. O efeito positivo da recirculação é mais claro na operação anaeróbia do que na aeróbia.

Em sua pesquisa Leite *et al.* (2001) analisaram o processo de bioestabilização anaeróbia de resíduos sólidos orgânicos putrescíveis de origem urbana e rural. Os resíduos de origem urbana foram constituídos, basicamente, de restos de fruta, verduras e folhagens, enquanto o rúmen bovino foi adquirido no matadouro de Campina Grande-PB. As proporções de rúmen empregadas foram de 5, 10 e 15% (percentagem em peso). O trabalho foi realizado em um sistema experimental, constituído basicamente por quatro reatores anaeróbios operados em batelada, com capacidade unitária de 20 L. A eficiência do processo foi determinada por meio do monitoramento dos parâmetros avaliativos, os sólidos totais voláteis (SVT), da demanda química de oxigênio (DQO) e do nitrogênio total Kjeldhal (NTK). Dentre os percentuais de inóculo aplicados, o percentual de 15% contribuiu mais significativamente para o desempenho do processo, pois resultou em relação C/N favorável, além de proporcionar maior massa de microrganismos. O processo de tratamento anaeróbio de resíduos sólidos orgânicos com alta concentração de sólidos apresenta possibilidade real de se tornar alternativa promissora de tratamento, para esses tipos de resíduos.

Hartmann e Ahring (2005) pesquisaram a influência da adição de esterco bovino na digestão anaeróbia termofílica de resíduos sólidos urbanos. Inicialmente a FORSU foi co-digerida com esterco na proporção 1:1 e na fase seguinte adicionou-se a recirculação do

lixiviado. O sistema apresentou estabilização após 6 semanas de operação. Ao final do experimento cerca de 69-74% dos sólidos voláteis foram reduzidos. Percebeu-se que a recirculação do lixiviado auxiliou na estabilização do pH e redução da amônia.

Nesta revisão bibliográfica comprova-se que diversos estudos utilizando a digestão anaeróbia com diferentes inóculos, resulta na confirmação de que o seu potencial de uso como alternativa tecnológica para o tratamento da FORSU. Verifica-se que, em todas as pesquisas apresentadas, são demonstrados resultados positivos com relação ao uso de inóculos. Esta técnica acelera a digestão, aumenta a produção de biogás, e, além disso, dá destino a resíduos às vezes tidos como inservíveis.

4.0 METODOLOGIA

4.1 ETAPA 01

4.1.1 Caracterização do local e quantitativos

Na etapa de caracterização do local serão avaliados os hábitos e o processo de produção de matéria orgânica do restaurante universitário (RU) da Universidade de Brasília – UNB. Será coletado diariamente ao longo de uma semana os dados referentes a massa de toda matéria orgânica processada durante todo dia. A separação do resíduo orgânico e do resíduo não orgânico acontece no momento em que começa a produção das refeições e essa separação continua nos refeitórios quando os usuários levam os seus pratos para limpeza. O RSO em questão está relacionado a produção e ao consumo por parte dos estudantes no café da manhã, almoço e jantar. Para isso uma balança com capacidade de $100\text{kg} \pm 0,02\text{kg}$ ficará localizada no setor de descarga do RU. Assim será determinado a massa de MO durante o dia. A caracterização dos resíduos sólidos e a fração orgânica se determinará através do trabalho realizado por Pinto (2000). No entanto será utilizado o cardápio semanal do RU, disponibilizado pelo restaurante universitário para identificação dos resíduos sólidos orgânicos. Será tabelado através de informações fornecidas pela administração do restaurante universitário o fluxo de alunos que freqüentaram o RU durante um período semanal determinado.

Com os dados coletados ao longo da semana será possível determinar:

- Média de RSOD/Nº de Usuários;
- Média de Usuários (7 dias);
- RSODmédio(7 dias);

O RSODmédioRU, representa o valor médio diário em uma semana de coleta de RSOD, que será utilizado no dimensionamento do Biodigestor.

4.2 ETAPA 02

4.2.1 Dimensionamento e Caracterização do Biodigestor

Na segunda etapa determinará como será a elaboração e o dimensionamento teórico do biodigestor, tendo como base o valor de RSODmédioRU. O Peso Total da Mistura diária que alimentará o Biodigestor (PTMd) será representado pela soma do RSODmédioRU, do inoculante, do NaCo_3 (tamponamento) e do Teor de Umidade da mistura. Para essa determinação o projeto irá seguir Pinto (2000) onde pode-se apurar os seguintes parâmetros para o cálculo:

- Inoculante (Si) – FI (fator de inoculação) = 0,2
- Tamponamneto - NaCO₃ = 0,06 kg/kg de inoculante
- Teor de Umidade (T.U) = 0,58 L/Kg de inoculante

Assim, os valores dos elementos constituintes da mistura serão determinados da seguinte maneira.

- Inoculante(esterco bovino) :

Para o calculo foi utilizado a equação

$$FI = \frac{ST_i}{ST_i + ST_s} \quad (4)$$

Onde,

Fi = fator de inoculação;

STi = Massa de inoculante (kg);

STs = Massa total de sólidos (kg).

- NaCO₃ (carbonato de cálcio)

- Tamponamento = 0,06 kg/kg x STi (5)

Onde,

0,06 (kg/kg) = fator que relaciona o tamponamento com o inoculante;

STi = Inoculante (kg)

- H₂O (água)

H₂O= 0,58 L/kg xSTi(6)

Onde,

0,58 L/kg = fator que relaciona o percentual de H₂O com o teor de umidade encontrado na matéria orgânica.

STi = Massa de inoculante (kg)

O cálculo do peso total da mistura – diária (PTMd) é dado por:

$$PTMd = STs \text{ (kg)} + STi \text{ (kg)} + NaCO_3 \text{ (kg)} + H_2O \text{ (L)} \quad (7)$$

4.2.2 Volume Total do Biodigestor

4.2.2.1 Volume diário ocupado pela mistura

Para a determinação do volume ocupado pela mistura será considerado a densidade de cálculo no valor de 1g/ml. A densidade da mistura terá um valor superior ao considerado. Para compensar a diferença da densidade real com a densidade adotada, estará intrínseco no volume adicional uma margem de erro com a majoração deste volume.

O calculo do volume diário poderá ser determinado com a equação:

$$V_D = PTM_d / \rho_a \quad (8)$$

Onde,

V_D = Volume diário;

PTM_d = Massa total da mistura diária (kg)

ρ_a = densidade da água.

4.2.2.2 Tempo de Detenção Hidráulica – TDH

O tempo de detenção hidráulica e a eficiência do biodigestor serão obtidos em função do inoculante utilizado. Verificar tabela 3.3, dissertação de Barcelos (2009) .

4.2.2.3 Determinação dos volumes para os tanques 1 e 2 (Estágios 1 e 2)

O volume dos tanques 1 e 2 serão dimensionados para atender o período de 4 dias de alimentação e um volume adicional destinado ao ocupado pelos gases produzidos. O volume adicional sugerido se determinará em função do nível de produção de metano em cada câmara.

Equação que será utilizada para determinar o volume dos tanques:

$$V_T = V_D * T_d * F_{va} \quad (9)$$

Onde,

V_T = Volume total do tanque (m³);

V_D = Volume diário (m^3);

T_d = Tempo de detenção hidráulica;

F_{va} = Percentual para o volume adicional do tanque.

4.2.2.4 Determinação do volume para o tanque 3 (Estágio 3)

No tanque 3 ocorrerá a produção efetiva do gás Metano e neste estágio a temperatura será mantida para a digestão da Bactérias metanogênicas, termofílicas. O tempo de detenção hidráulica para este tanque será de 4 dias. O método de calculo será baseado no cálculo do tanques 1 e 2.

4.2.2.5 Especificação do Tanque Utilizado

O tanque proposto no projeto atenderá as seguintes características:

- Elevada Resistência química e a solventes;
- Atóxico;
- Alta resistência à fratura por flexão ou fadiga;
- Boa resistência ao impacto acima de 15°C;
- Baixa absorção de umidade e estabilidade térmica;
- Resistente a altas temperaturas;
- Alta resistência à tensão; compressão; tração;
- Impermeável;
- Inerte (ao conteúdo), baixa reatividade.

O biodigestor proposto será composto por um triturador mecânico, uma câmara de alimentação, três tanques interligados com alimentação contínua e sistema de aquecimento solar e elétrico para controle da temperatura.

4.3 Descrição das etapas de produção do biogás através do biodigestor proposto

O biodigestor será apresentado e descrito através de um processo de produção baseado no sistema de digestão anaeróbia onde o processo se dará de forma contínua. Os reatores do sistema funcionarão de acordo com as necessidades desejadas para atingir as metas propostas em cada fase do processo, sendo assim os reatores terão temperaturas e tempos de detenção hidráulicos diferentes, propiciando para cada reator em particular uma fase na degradação da matéria orgânica.

Na entrada, junto ao sistema, dos resíduos sólidos orgânicos será instalado um triturador mecânico. A definição do triturador e suas características seguirão o proposto por Pinto (2000).

4.4 Controle da Temperatura

No processo anaeróbio será implantado um sistema de aquecimento baseado na energia solar, onde através deste sistema cada reator terá a temperatura necessária para manter nível de bactérias desejado.

4.5 Produção teórica do gás Metano

De acordo com a equação estequiométrica pode-se obter relação para determinação da Massa de metano será dada pela equação

$$\text{CH}_4 = (288/933) * \text{STV} \quad (10)$$

Onde,

STV: Sólidos totais voláteis (kg)

Com o valor da massa específica do metano encontrado em Pinto (2000) , será possível estimar o volume teórico do metano produzido.

Com análise da tabela 5.4 Pinto (2000) será obtido o percentual de SVT para o esterco bovino.

Componentes	Parâmetros				
	pH	DQO (g/kg)	Teor de Umidade (%)	Sólidos Totais (%)	Sólidos Totais Voláteis (%)
Esterco Bovino	7,2	656,5	80,0	20,0	84,5
Esterco Suíno	6,0	603,00	84,0	16,0	84,9
Rúmen Bovino	7,5	652,5	68,9	31,1	67,1
FORSUP	5,8	650,5	75,9	24,1	82,6

Tabela4.1: Características físico-químicas dos inóculos e FORSUP da pesquisa.Pinto (2000).

A produção de Gás Metano será obtida através do experimento realizado por Barcelos (2009).

Um controle dos fatores que influenciam na produção do Biogás, será realizado, usando o experimento de Barcelos (2009), para assim determinar o volume da produção diária de gás metano.

4.6 Utilização do Gás Metano

O gás metano produzido será utilizado diretamente como fonte energética para a utilização na preparação dos alimentos na caldeira do Restaurante Universitário. O gás que por ocasião não for consumido pelo restaurante universitário será utilizado na alimentação de motor que funcionará em conjunto com gerador elétrico e fornecerá energia térmica para o controle da temperatura do sistema.

4.6.1 Consumo de Diesel pelo RU

A relação de poder calorífico entre o Metano e o combustível utilizado no RU (diesel) é destacada na tabela 5.5. Com essa análise será obtido o poder calorífico equivalente em Diesel disponível para utilização nas caldeiras do RU para preparação dos alimentos.

4.6.2 Relação Diesel/Gás Metano

Para determinação da relação entre o diesel que é consumido no RU e o gás metano será usado como parâmetro a tabela com o poder calorífico dos principais combustíveis determinado por Pinto (2000).

$$\text{Óleo Diesel} = \text{PDGM} \times \text{DGM}$$

Onde,

PDGM: Produção diária de gás metano (m³);

DGM: Coeficiente que relaciona o diesel/gás metano.

4.7 Biofertilizante

Será determinada a produção de Biofertilizante e de afluentes fazendo uma proporção com o que entra na câmara de fermentação e a massa residual final ou seja a massa degradada.

Parte do Biofertilizante (percolado) será utilizado para retroalimentar as câmaras do Biodigestor como inoculante e assim ajudará na manutenção do tamponamento (Ph).

5.0 RESULTADOS E ANÁLISES

5.1 ETAPA 01

5.1.1 Caracterização do local e quantitativos

A primeira etapa na elaboração do Biodigestor foi o levantamento da quantidade de matéria orgânica descartada pelo restaurante da universidade de Brasília – Unb durante o seu funcionamento diário. Devido ao processo de mistura dos alimentos durante o consumo e no seu descarte final, não foi possível determinar a fração de cada sólido que compunha a mistura, porém através do cardápio diário, ver tabela 5.1, foi possível identificar os alimentos que faziam parte da mistura como demonstra a tabela abaixo. A caracterização dos resíduos sólidos e a fração orgânica foi determinada através do trabalho realizado por CASTILHOS JÚNIOR e NAVARRO (1989).

Segunda feira - 17/11/2014	Terça feira - 18/11/2014	Quarta feira - 19/11/2014
Refeitório	Refeitório	Refeitório
Leite, café, cha de erva cidreira, leite de soja	Leite, café, cha de camomila, leite de soja	Leite, café, cha de hortelã, leite de soja
Achocolatado sem leite, iogurte de fruta, pão frances	Achocolatado sem leite, iogurte de fruta, pão frances	Achocolatado sem leite, iogurte de fruta, pão Frances
Margarina/Geleia	Margarina/Geleia	Margarina/Geleia
Queijo minas, maçã, goiabada	Ricota, banana, manga	Queijo mussarela, melancia, caju
Refeitório	Refeitório	Refeitório
Tomate e alface crespa, manjerição	Acelga e cenoura ralada, vinagrete	Pepino e alface roxa, ervas
Frango cremoso (coxa e sobrecoxa)	Cozido belga (paleta)	Carne moída com legumes (paleta), polenta
Farofa de cenoura, mix de grãos (soja, grão de bico)	Batata sautee, macarronada com soja	Soja xadrez
Arroz branco, arroz integral e feijão	Arroz branco, arroz integral e feijão	Arroz branco, arroz integral e feijão
Doce de leite - tabletes, suco de acerola	Melancia, suco de caju	Maçã, goiabada

Refeitorio	Refeitorio	Refeitorio
Beterraba ralada e acelga, hortelã	Repolho branco e berinjela, limão	Agrião e abobora ralada, rose
Creme de espinafre, torrada, tortilha (ovos)	Sopa de feijão com macarrão, torrada, frango teriyaki	Caldo verde, torrada e frango ao molho de ervas
Soja em grão com azeitonas	Picadinho de soja	Bobó de soja
Arroz branco, arroz integral e feijão	Arroz branco, arroz integral e feijão	Arroz branco, arroz integral e feijão
Laranja, suco de caju	Melão, suco de acerola	Abacaxi, suco de laranja

Tabela 5.1: Cardápio semanal do RU. Fonte: RU – UNB.

Quintafeira -20/11/2014	Sexta feira - 21/11/2014	Sábado feira - 22/11/2014
Refeitorio	Refeitorio	Refeitorio
Leite, café, cha de erva cidreira, leite de soja	Leite, café, cha de erva doce, leite de soja	Leite, café, cha de hortelã, leite de soja
Achocolatado sem leite, iogurte de fruta, pão frances	Achocolatado sem leite, iogurte de fruta, pão frances	Achocolatado sem leite, iogurte de fruta, pão frances
Margarina/Geleia	Margarina/Geleia	Margarina/Geleia
Queijo minas, laranja, acerola	Ricota, mamão, umbu	Queijo prato, melão, tamarino
Refeitorio	Refeitorio	Refeitorio
Berinjela e mix de folhas, hortelã	Alface lisa e beterraba ralada, limão	Alface roxa e pepino verde
Frango ao molho de mostrarda (coxa e sobrecoxa), quibe	Lasanha a bolonhesa - acelga refogada	Frango xadrez (peito), massa ao alho e óleo
Cenoura com ervilhas	Soja em grãos com vinagrete	Lentilha com pimentões
Arroz branco, arroz integral e feijão	Arroz branco, arroz integral e feijão	Arroz branco, arroz integral e feijão
Banana , suco de maracuja	Laranja, suco de acerola	Mamão, suco de laranja
Refeitorio	Refeitorio	Refeitorio
Tomate e alface crespa, salsa	Chuchu e chicoria, vinagrete	Alface crespa e cenoura ralada, mostarda e mel
Sopa Rica (abobrinha,	Madioca e batata, torrada,	Creme de cenoura, torrada,

cenoura, batata), torrada, carne de sol	frango assado com tomates	peixe ao molho napolitano
Mix de grãos	Proteína de soja	Ervilha com ervas
Arroz branco, arroz integral e feijão	Arroz branco, arroz integral e feijão	Arroz branco, arroz integral e feijão
Doce de leite - tablete, suco de manga	Melancia, suco de goiaba	Banana, suco de maçã

Tabela 5.1: Cardápio semanal do RU. Fonte: RU – UNB. (Continuação)

Os RSOD-RU são gerados principalmente durante o processo de manipulação e produção dos alimentos onde é feita inicialmente a seleção dos alimentos impróprios para consumo e através da sua manipulação e limpeza é retirada as cascas e partes dos alimentos que são descartados. Após o preparo, o alimento é encaminhado para o consumo onde ocorre outra etapa na formação de RSOD-RU, representada pela matéria orgânica desperdiçada pelos usuários do RU.

A determinação do peso dos RSOD-RU foi realizada ao longo do funcionamento diário de segunda a sábado em que foram servidos café da manhã, almoço e jantar. O material antes de ser descartado foi pesado em sacos plásticos. Toda a matéria orgânica se encontrava misturada, ou seja não houve separação dos resíduos descartados. Com base na pesquisa realizada em uma semana foi determinado o valor da massa total média diária.

Massa total média diária de RSOD- RU = 1.247,00Kg

Com os dados do número de usuários que frequentaram os refeitórios do restaurante universitário num período de 6 dias, ver figura 5.2, e o peso dos resíduos descartado, foi possível relacionar a média de resíduos descartada por usuário do RU – UNB.

Data	Refeitório 01			Refeitório 02			Refeitório 03		
	Almoço	Café da manhã	Total Refeitório	Almoço	Café da manhã	Total Refeitório	Almoço	Jantar	Total Refeitório
17/11/2014	599	282	881	960	152	1112	1041	207	1248
18/11/2014	677	209	886	888	305	1193	1117	244	1361
19/11/2014	453	275	728	863	178	1041	1143	238	1381
20/11/2014	551	164	715	910	326	1236	1144	448	1592
21/11/2014	392	267	659	593	135	728	822	0	822
22/11/2014	0	143	143	0	0	0	98	222	320
Total	2672	1340	4012	4214	1096	5310	5365	1359	6724

Tabela 5.2: Tabela com o quantitativo de usuários que frequentaram o RU. Fonte: RU-UNB.

	Refeitório 04			Refeitório 05			Refeitório 06			
Data	Almoço	Jantar	Total Refeitório	Almoço	Jantar	Total Refeitório	Almoço	Jantar	Total Refeitório	Total Geral
17/11/2014	1191	0	1191	797	661	1458	633	606	1239	7129
18/11/2014	1060	0	1060	772	830	1602	635	428	1063	7165
19/11/2014	1127	0	1127	765	682	1447	563	536	1099	6823
20/11/2014	1027	199	1126	785	162	947	633	609	1242	6858
21/11/2014	1014	0	1014	646	442	1088	788	257	1045	5356
22/11/2014	0	0	0	0	0	0	0	0	0	463
Total	5419	199	5518	3765	2777	6542	3252	2436	5688	33794

Tabela 5.2: Tabela com o quantitativo de usuários que freqüentaram o RU entre 17/11/2014 a 22/11/2014 (Continuação). Fonte: RU – UNB.

Data	17/11	18/11	19/11	20/11	21/11	22/11
Nº usuário	7129	7165	6823	6958	5356	463
RSOD-RU	1247,00	1254,00	1194,00	1218,00	937,300	81,025

Tabela 5.3: Massa em Kg dos Resíduos Sólidos Orgânicos Descartado pelo R.U.

Com os dados coletados e manipulados, ver tabela 5.3, pode-se obter:

- Média de RSOD/Nº de Usuários = 175,00g
- Média de Usuários (7 dias) = $33.794 / 7 = 4842$ usuários
- RSODmédio (7 dias) = $4842 \times 0,175 = 847,35\text{Kg}$

RSODmédioRU, representa o valor médio diário de RSOD, que será utilizado no dimensionamento do Biodigestor para compensar a variação semanal, com pouca produção aos sábados e o não funcionamento aos domingos. A alimentação será contínua com o acúmulo de resíduos para a utilização nos dias com produção abaixo da média diária.

5.2 ETAPA 02

5.2.1 Dimensionamento e Caracterização do Biodigestor

A segunda etapa consistiu na elaboração e no dimensionamento teórico do biodigestor com base no valor de RSODmédioRU. O Peso Total da Mistura diária que alimentará o Biodigestor (PTMd) é representado pela soma dos RSODmédio-R.U, do inoculante, do NaCo₃ (tamponamento) e o Teor de Umidade da mistura. Seguindo Pinto (2000), utilizaram-se os seguintes parâmetros de cálculo:

- Inoculante (Si)– FI (fator de inoculação) = 0,2
- Tamponamneto - NaCO₃ = 0,06 kg/kg de inoculante
- Teor de Umidade (T.U) = 0,58 L/Kg de inoculante

Para um RSODmédio = 847,00Kg de massa diária e com os parâmetros citados acima, pode-se obter os seguintes valores dos elementos constituintes da mistura.

- Inoculante(esterco bovino) (Si) = $847 \times 0,2 / 0,8 = 212,00\text{Kg}$

Para o cálculo foi utilizado a equação

$$FI = \frac{ST_i}{ST_i + ST_s} \quad (4)$$

Onde,

Fi = fator de inoculação;

STi = Inoculante;

STs= Massa total de sólidos.

- NaCO₃ (carbonato de cálcio)

- Tamponamento = $0,06 \times Si$ (5)

onde,

0,06 kg/kg = fator de relação com o inoculante;

Si = Inoculante (kg)

Tamponamento = $0,06 \times 212 = 12,72 \text{ Kg}$.

- H₂O (água)

H₂O = $0,58 \text{ L/kg} \times Si$ (6)

onde,

0,58 L/kg = fator que relaciona o percentual de H₂O com o teor de umidade encontrado na matéria orgânica.

Si = inoculante (kg)

A massa total da Mistura – diária (PTMd) é calculado por:

$$PTMd = STs \text{ (kg)} + STi \text{ (kg)} + NaCO_3 \text{ (kg)} + H_2O \text{ (L)} \quad (7)$$

$$PTMd = 847,00 + 212,00 + 12,72 + 123,00 = 1195,00\text{Kg}$$

5.2.2 Volume Total do Biodigestor

5.2.2.1 Volume diário ocupado pela mistura

Para a determinação do volume ocupado pela mistura considerou a densidade de cálculo no valor de 1g/ml. Sendo a densidade da mistura ser superior ao valor considerado, o valor obtido será superior ao real, sendo esse volume adicional utilizado como margem de utilização e demanda do Biodigestor.

Volume Diário = PTMd/densidade da água (8)

Volume Diário = $1195\text{Kg}/1.000\text{kg/m}^3 = 1,195\text{m}^3 = 1,2\text{m}^3$ volume de mistura diária.

5.2.2.2 Tempo de Detenção Hidráulica – TDH

Segundo Barcelos (2009) o tempo de detenção hidráulica foi obtido em função do inoculante utilizado. Verificar tabela 3.3.

TDH (inoculante – esterco bovino) = 11 dias

Eficiência do Biodigestor = 67% a 84%

5.2.2.3 Volume dos tanques (estágios 1 e 2)

O volume dos tanques 1 e 2 serão dimensionados para atender o período de 4 dias de tempo de detenção e um volume adicional destinado ao ocupado pelos gases produzidos.

Volume dos Tanques 1 e 2 = $(1,2\text{m}^3 \times 4\text{dias}) \times 1,2$ (volume adicional) = $5,76\text{m}^3$

Volume Tanque (1 e 2) = $6,00\text{m}^3$

5.2.2.4 Volume do Tanque 3 (estágio 3)

O tanque 3 será o estágio onde ocorrerá a produção efetiva do gás Metano com a temperatura mantida para a digestão da Bactérias metanogênicas, termofílicas e TDH de 4 dias.

Volume do Tanque 3 = $(1,2\text{m}^3 \times 4\text{dias}) \times 1,3$ (volume ocupado pelos gases) = $6,24\text{m}^3$

Volume Tanque 3 = $7,00\text{m}^3$

5.2.2.5 Especificação do Tanque Utilizado

O tanque proposto atenderá as seguintes características:

- Elevada Resistência química e a solventes;
- Atóxico;
- Alta resistência à fratura por flexão ou fadiga;
- Boa resistência ao impacto acima de 15°C;
- Baixa absorção de umidade e estabilidade térmica;
- Resistente a altas temperaturas;
- Alta resistência à tensão; compressão; tração;
- Impermeável;
- Inerte (ao conteúdo), baixa reatividade.

O biodigestor proposto será composto por triturador mecânico, câmara de alimentação, três tanques interligados com alimentação contínua e sistema de aquecimento solar e elétrico para controle da temperatura.

5.3 Descrição das etapas de produção do biogás através do biodigestor proposto.

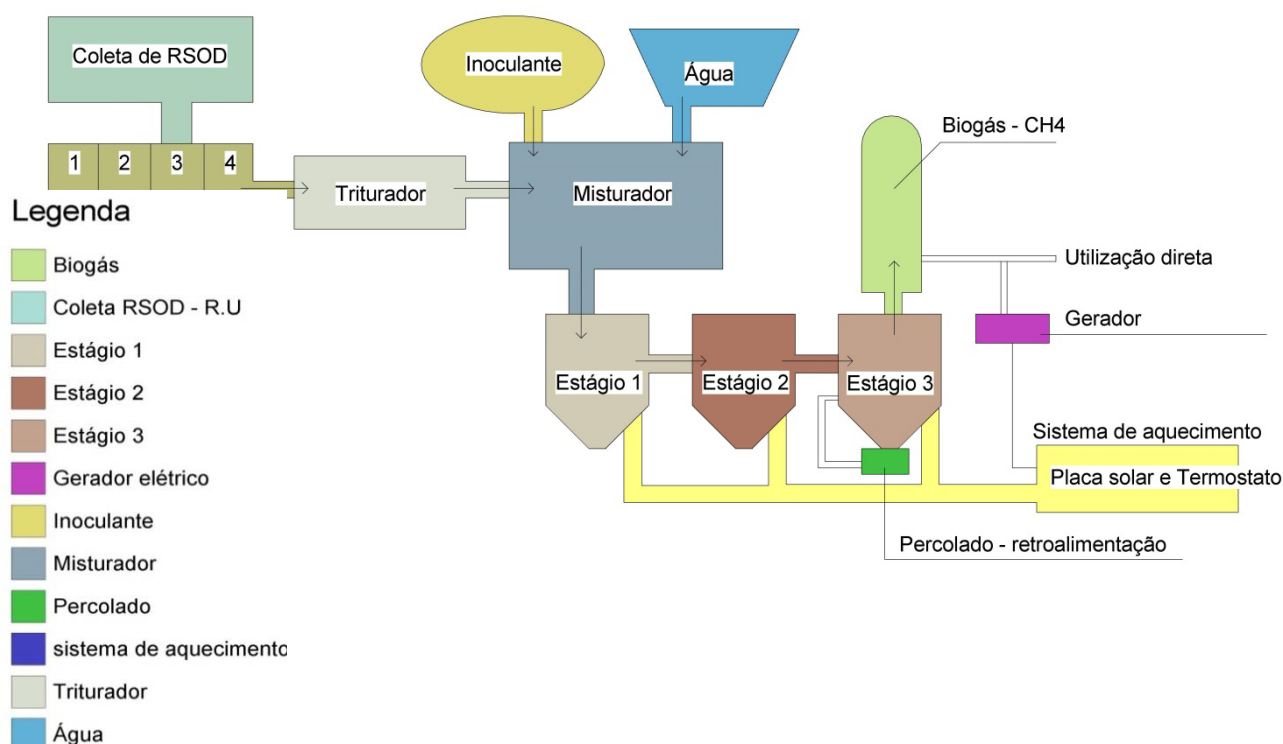


Figura 5.1: Fluxograma do processo anaeróbico e de composição de etapas do biodigestor proposto.

O biodigestor proposto, ver figura 4.3, é composto por triturador mecânico do tipo “trap”, para a redução das partículas e aumento da superfície de contato entre a mistura e as

bactérias biodegradantes, tendo este a capacidade de triturar e reduzir as partículas uma dimensão máxima de 2,5cm. As outras parte das etapas são formadas pela câmara de alimentação, pelos três tanques interligados com alimentação contínua e pelo sistema de aquecimento solar e elétrico para controle da temperatura.

Primeiramente ocorrerá a coleta dos RSOD-RU, em seguida a matéria será mantida no depósito de RSOD por um período de 4 (quatro) dias para permitir que a matéria tenha o mesmo período de degradação no estágio 1. Os resíduos sólidos acumulados por quatro dias no depósito de RSOD terão suas dimensões reduzidas no triturador mecânico, após a redução das partículas o material será misturado com água e inoculante para estabelecer o teor de umidade e o fator de inoculante respectivamente na fração calculada. Após a mistura o material será transportado para a câmara 1,0 (um) onde ocorrerá o primeiro estágio de degradação da matéria orgânica no processo de hidrólise, com a quebra em moléculas menores realizada pelas Bactérias Facultativas Mesofílicas na proporção calculada. Nesse estágio a matéria orgânica permanecerá no tanque durante o período de quatro dias, em seguida o material será transportado para o segundo estágio onde ocorrerá a degradação das moléculas em ácidos orgânicos, gás carbônico e hidrogênio que serão utilizados no terceiro estágio onde ocorrerá a produção de biogás (CH_4) pelas bactérias metanogênicas termofílicas. O percolato produzido na terceira etapa entrará no sistema como inoculante, melhorando a eficiência na produção de gás metano sendo utilizado como tamponamento da solução.

5.4 Controle da Temperatura

A temperatura será controlada através de um sistema de aquecimento solar e complementada com aquecimento por termostato que utilizará parte da energia gerada no biodigestor para a manutenção da temperatura em dias de tempo nublado ou com pouca radiação solar. O biodigestor será construído com material isolante térmico (lã de vidro) com espessura de 75mm, para evitar trocas de calor com o ambiente e reduzir os gastos de energia para manter o sistema na temperatura ideal de degradação da matéria orgânica. A manutenção da temperatura é fator determinante para a eficiência do biodigestor e redução do tempo de detenção o que resultará na redução do volume do biodigestor que conseqüentemente com um menor volume necessitará de menos energia térmica para elevar e manter a temperatura da mistura no biodigestor.

A temperatura será mantida entre 30 °C e 35°C no tanque 1 e 2 e entre 58°C e 63°C no tanque 3, com variação de 1°C que demonstra temperatura ideal para a decomposição da matéria orgânica pelas bactérias metanogênicas, mesofílicas e termofílicas.

5.5 Produção teórica do gás Metano

Por meio da equação (10), Pinto (2000) obteve a seguinte relação:

$$\text{CH}_4 = (288/933) * \text{STV} \quad (10)$$

Onde,

STV: Resíduo a ser degradado (kg).

Sabendo-se a massa específica do metano (0,717kg/m³), é possível obter uma estimativa do volume teórico do metano produzido.

Com análise da tabela 5.4 Pinto (2000) obteve-se a porcentagem de SVT para esterco bovino de 84,5% e ST de 20%.

Componentes	Parâmetros				
	pH	DQO (g/kg)	Teor de Umidade (%)	Sólidos Totais (%)	Sólidos Totais Voláteis (%)
Esterco Bovino	7,2	656,5	80,0	20,0	84,5
Esterco Suíno	6,0	603,00	84,0	16,0	84,9
Rúmen Bovino	7,5	652,5	68,9	31,1	67,1
FORSUP	5,8	650,5	75,9	24,1	82,6

Tabela 5.4: Características físico-químicas dos inóculos e FORSUP da pesquisa. Pinto (2000).

Sendo a massa média diária de RSOD-R.U de 1.200Kg, o que resulta em 202,8Kg de SVT (1.200*0,169) Pinto (2000).

Utilizando-se a equação (10) determinamos a massa de Metano no valor de 62,6Kg e ainda sendo a massa específica do Metano igual a 0,717Kg/m³, pudemos obter o volume diário de gás Metano igual a 87,3m³ (62,6Kg/0,717Kg/m³). A produção de Gás Metano obtido experimentalmente no trabalho de Barcelos (2009) foi de 0,11m³ comparado ao calculado que foi de 0,068m³. Como esperamos realizar o controle dos fatores que influenciam na produção

do Biogás como feito experimentalmente, o volume de PDOE obtido experimentalmente seria de 141,22m³.

5.6 Utilização do Gás Metano

O gás metano produzido será utilizado diretamente como fonte energética para a utilização na preparação dos alimentos na caldeira do Restaurante Universitário. O gás não consumido pelo restaurante universitário será utilizado na alimentação de motor que funcionará em conjunto com gerador elétrico que fornecerá energia térmica para o controle da temperatura do sistema e podendo gerar energia para iluminação do Campus Universitário, principalmente em áreas pouco iluminadas como nos estacionamentos do ICC norte e ICC sul.

5.6.1 Consumo de Diesel pelo RU

A relação de poder calorífico entre o Metano e o combustível utilizado no R.U (diesel) é demonstrada na tabela 5.5. Com essa análise podemos obter o poder calorífico equivalente em Diesel disponível para utilização nas Caldeiras do R.U para preparação dos alimentos.

Produção de Gás Metano = 141,22 m³

5.6.2 Relação Diesel/Gás Metano

Combustível	kcal
Madeira	4.500/kg
Briquetes de carvão	8.000/kg
Carvão vegetal	7.620/kg
Diesel	8.500/litro
Gasolina	7.700/litro
Querosene	8.800/litro
BPF (óleo combustível)	8.400/kg
BTE (óleo combustível)	10.400/kg
Álcool etílico 96° GL	5.100/litro ou 6.400/kg
Gasogênio	1.250/m ³
GLP (gás liquefeito de petróleo)	11.000/kg

Tabela 5.5 – Poder calorífico de alguns combustíveis. Lucas Junior (2009).

- Poder Calorífico do Diesel = 8.500Kcal/litro
- Poder Calorífico do Gás Metano = 7.000Kcal/m³

- Relação Gás Metano/ Óleo Diesel = 7.000kcal/m³/8.500Kcal/litro = 0,82 litro/m³.

Equivalência Gás Metano em Óleo Diesel

$$\text{Óleo Diesel} = 141,22\text{m}^3 * 0,82\text{litros/m}^3 = 116,3 \text{ litros}$$

Portanto a produção de Gás Metano no Biodigestor equivalerá em poder calorífico ao volume de 116,3 litros de Óleo Diesel diário disponível para a produção de alimento no R.U-UnB.

Dados fornecidos pela Administração do RU mostram que o consumo de Óleo Diesel utilizado para aquecimento das caldeiras é de 5.000 litros a cada quinze dias. Com a produção de gás Metano pelo Biodigestor com equivalente a 116,3 litros de Óleo Diesel, irá gerar uma economia de 1.744,5 litros de Óleo Diesel quinzenais no seu consumo.

Considerando que o Óleo Diesel está Custando R\$ 2,64 (2014), a produção de biogás irá reduzir os gastos com Óleo Diesel no valor de R\$ 9.210,96 (Nove mil duzentos e dez Reais e noventa e seis centavos) mensais e R\$110.531,52 (Cento e dez mil, quinhentos e trinta e um reais e cinquenta e dois centavos) anuais.

5.7 Biofertilizante

Reator	MR Inicial (g)	MR Final (g)	Massa Degradada (g)
EB I	1049,63	960,00	89,63
EB II	1049,63	905,00	144,63
ES I	1046,54	750,00	296,54
ES II	1046,54	723,00	323,54
RB I	1041,47	830,00	211,47
RB II	1041,47	935,00	106,47
T I	839,11	425,00	414,11
T II	839,11	560,00	279,11

Tabela 5.6: Diferenças de massa do MR inicial e final. Pinto (2000).

A produção do Biofertilizante ou de efluente no biodigestor é proporcional ao que entra na câmara de fermentação. A tabela 5.6 mostra a massa residual final e inicial e a massa degradada. Para o nosso trabalho em que foi considerado esterco bovino como inoculante (EB I), a quantidade de matéria não degradada em porcentagem comparada a matéria inicial na biodigestão foi de 91,00%, sendo assim a massa de Biofertilizante que se espera produzir é de 1.098,00 Kg.

Parte do Biofertilizante (percolado) será utilizado para retroalimentar as câmaras do Biodigestor como inoculante e manutenção do tamponamento (pH).

6.0 CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES

6.1 CONCLUSÕES

Considerando os resultados esperados para a produção de Biogás no Biodigestor, proposto no projeto, onde foi calculado o valor de 116,3 litros de Óleo Diesel utilizando resíduos sólidos orgânicos gerados pelo Restaurante Universitário da Universidade de Brasília - UNB e comparando com o consumo diário de óleo diesel para a produção dos alimentos nas caldeiras do RU, foi possível verificar a viabilidade econômica e ambiental do projeto com o reaproveitamento de matéria orgânica descartada.

Concluimos que apesar da produção de biogás através da biodigestão dos RSOD-RU não ter toda a demanda diária no consumo energético para produção de alimentos, o gás produzido poderá reduzir em 35% o consumo de óleo diesel utilizado como fonte de energia térmica nas caldeias.

A produção de biofertilizante gerada tem potencial econômico e pode ser comercializada, representando uma renda extra para do RU, contribuindo assim para uma redução dos gastos com a manutenção do sistema.

Portanto o objetivo deste projeto foi satisfeito, pois a produção do biogás ficou dentro da realidade esperada e no quesito sustentabilidade o projeto pode comprovar que através do reuso da matéria orgânica descartada, pode-se obter uma energia alternativa e essa matéria orgânica teve um fim adequado.

6.2 RECOMENDAÇÕES

Recomenda-se a realização de pesquisas de digestão anaeróbia de RSOD-RU inoculado com esterco bovino, esterco suíno, rúmen bovino e o lodo produzido na ETE Norte em Brasília/DF.

Propõe-se a realização dos cálculos usando-se um novo valor para massa média diária desconsiderando o sábado, devido ao seu baixo número de RSOD-RU produzido. Fazendo-se assim uma comparação com o valor calculado no projeto proposto.

Considerando-se as três câmaras propostas no projeto de biodigestão, recomenda-se verificar experimentalmente a temperatura e o controle do pH que se adapta adequadamente a cada estágio proposto nos respectivos reatores.

Recomenda-se a realização da coleta de dados em períodos diferentes e com uma duração maior de tempo, para que se tenha uma avaliação mais precisa do comportamento dos usuários que frequentam o restaurante universitário, bem como para verificar uma possível alteração na massa média diária usada no dimensionamento do biodigestor.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Agdag, O. N; Sponza, D. T. (2007). “Co-digestion of mixed industrial sludge with municipal solid wastes in anaerobic simulated landfilling bioreactors”.*Journal of Hazardous Materials*, (140), 75–85.

AMARAL, C. C, et al. Biodigestão anaeróbia de dejetos de bovinos leiteiros submetidos a diferentes tempos de retenção hidráulica. *Revista Ciência Rural*, vol.34, n°.6, p.1897-1902, nov/dez. 2004.

ARRUDA, M. H. et al. Dimensionamento de Biodigestor para Geração de Energia alternativa. *Revista científica de agronomia da Faculdade de Agronomia e engenharia florestal*, Garça, ano 1. n° 2, dez. 2002.

BARCELOS, B.R. (2009). Avaliação da partida da digestão anaeróbia da Fração Orgânica de Resíduos Sólidos Domésticos inoculados com diferentes resíduos agropecuários. Dissertação de Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos, Publicação, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 90 p.

BARRERA, P. Biodigestores: Energia, fertilidade e saneamento para zona rural. São Paulo:Ícone, 1983.

Beux, S. Avaliação do tratamento de efluentes de abatedouro em biodigestores anaeróbios de duas fases. 2005. 99 p. Dissertação de Mestrado em Ciências e Tecnologia de Alimentos – UEPG/PR, Universidade Estadual de Ponta Grossa, Ponta Grossa.

Bilgili, M. S.; Demir, A.; Ozkaya, B. (2006) “Influence of leachate recirculation on aerobic and anaerobic decomposition of solid wastes.” *Journal of Hazardous Materials*, doi:10.1016/j.jhazmat.2006.09.012.

BLOG oficial do projeto biogás fonte de energia para os ribeirinhos (Abaetetuba). <http://projeto-bio-abaetetuba.blogspot.com/>>. Acesso em: 25 jun. 2014.

Bouallagui, H.; Torrijos, M.; Godon, J.J.; Molleta, R.; Ben Cheikh, R.; Touhami, Y. (2004b) “Two-phase anaerobic digestion fruit and vegetable wastes: bioreactors performance”. *Biochemical Engineering Journal*.(21): 193–7.

Capela, I.; Rodrigues, A.; Silva, F.; Nadais, H.; Arroja, L. (2007) “Impact of industrial sludge and cattle manure on anaerobic digestion of the OFMSW under mesophilic conditions” *Biomass and Bioenergy*.32 (3): 245-251.

Carneiro, P. H. (2005). “Efeitos da adição de lodo ao inoculo de reator anaeróbio híbrido sólido-líquido tratando fração orgânica de resíduos sólidos urbanos”. Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos-SP, 135 p.

Cechi, F.; Pavan, P.; Mussacco, A.; Mata Alvarez, J.; Vallini, G. (1993) “Digesting the organic fraction of municipal solid waste : Moving from mesophilic (37 °C) to thermophilic (55 °C) conditions”. *Waste Management & Research*. 11: 403-1993.

CHERNICHARO, C. A. de L. Princípios do tratamento biológico de águas residuárias: reatores anaeróbios. Belo Horizonte: Segrac, 1997, v. 5. 245 p.

Cintra, I. S. (2003) “Estudo da Influência da Recirculação de Chorume Cdu e Chorume Inoculado na Aceleração do Processo de Digestão Anaeróbia de Resíduos Sólidos Urbanos”. Tese (Doutorado), Universidade Federal de Minas Gerais, Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, 352 p.

COMASTRI FILHO, J. A. Biogás: independência energética do pantanal mato-grossense. EMBRAPA, Corumbá - MS, Circular técnica no9, out. 1981.

CORTEZ, L. A. B.; LORA, E. E. S.; GÓMEZ, E. O. Biomassa para energia. Campinas:Editora da Unicamp, 2008.

Decreto Nº 8.468, de 8 de Setembro de 1976. Disponível em: <www.cetesb.sp.gov.br/Servicos/licenciamento/postos/legislacao/Decreto_Estadual_8468_7.pdf>. Acesso em 23 maio 2014.

DEGANUTTI, R, et al. Biodigestores rurais: modelo indiano, chinês e batelada. In: 40encontro de energia meio rural. São Paulo, 2002. Faculdade de Arquitetura, Artes e Comunicação. UNESP.São Paulo, 2002.

Del Borghi, A.; Converti, A.; Palazzi, E.; delBorghi, M. (1999) “Hidrolysis and thermophilic anaerobic digestion of sewage sludge and organic fraction of municipal solid waste”. *Bioprocess Engineering*, 20: 553-560.

DEUBLEIN, D; STEINHAUSER, A. Biogas from waste and renewable resources: an introduction. Weinhein-Germany: VerlagGmbH&Co. KGaA, 2008.

Fernández, A.; Sanchez, A.; Fonte, X. (2005) “Anaerobic co-digestion of a simulated organic fraction of municipal solid wastes and fats of animal and vegetable origin.” *Biochemical Engineering Journal* (26): 22–28.

Filho, J. A. C. Biogás, independência energética do Pantanal Mato-grossense. Circular técnica nº.9. Corumbá, EMBRAPA, 1981. 53p.

FONSECA, F. S. T, et al. Análise de viabilidade econômica de biodigestores na atividade suinícola na cidade de Balsas - MA: um estudo de caso. In: congresso da sociedade brasileira de economia, administração e sociologia rural. Porto Alegre, Jul. 2009. Universidade Estadual do Maranhão. Maranhão, 2009.

Foster-Carneiro, T. F. ; Pérez, M. ; Sales, L.I.R. (2006) “Dry-thermophilic anaerobic digestion of organic fraction of the municipal solid waste: Focusing on the inoculum sources”. *Bioresource Technology*. doi:10.1016/j.biortech.2006.07.008.

Garcia, J. L.; Patel, B. K. C.; Olliver, B. Taxonomic, phylogenetic, and ecological diversity of methanogenic Archaea. *Anaerobe*. v. 6, p. 205-226, 2000.

GASPAR, R. M. B. L. Utilização de Biodigestor em Pequenas e Médias Propriedades Rurais com Ênfase na Agregação de Valor: Um Estudo de Caso na Região de Toledo-PR, 2003. 106f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção)- Faculdade de Engenharia de produção e sistemas, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis-SC, 2003.

GOLDEMBERG, J.; NIGRO, F. E. B.; COELHO, S. T. Bioenergia no Estado de São Paulo: situação atual, perspectivas, barreiras e propostas. São Paulo: Imprensa Oficial do Estado de São Paulo, 2008.

Hartmann, H.; Ahring, B. K. (2005) “Anaerobic digestion of the organic fraction of municipal solid waste: Influence of co-digestion with manure.” *Water Research*, (39): 1543–1552.

Hartmann, H.; Møller, H.B.; Ahring, B.K. (2004) “Efficiency of the anaerobic treatment of the organic fraction of municipal solid waste: collection and pre-treatment”. *Waste Management and Research*. 22: 35–41.

HOLLANDA, J. B.; ERBER, P. Ferramentas para planejar energia no Brasil: matriz insumo produto. Disponível em: < www.inee.org.br >. Acesso em: 09 jul. 2014.

Kelleher, B. P.; Leahy, J. J.; Henihan, A. M.; O’Dwyer, T. F.; Sutton, D.; Leahy, M. J. Advances in poultry litter disposal technology – a review. *Bioresource Technology*. v.83, p. 27-36, 2002.

Leite, V. D.; Lopes, W. S.; Prasad, S. (2001). “Bioestabilização anaeróbia de resíduos sólidos orgânicos em reatores de batelada” *Revista brasileira de engenharia agrícola ambiental*, Campina Grande, 5 (1): 119-123.

Leite, V.D.; Povinelli, J. (1999) “Comportamento dos sólidos totais no processo de digestão anaeróbia de resíduos sólidos urbanos e industriais” *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande-PB, DEAg/UFPB, 3 (2): 229-232.

Leite, V.D.; Silva, S.A.; Sousa, J.T.; Lopes, W.S.; Oliveira, S.A. (2005) “Co-digestão anaeróbia de resíduos sólidos orgânicos”. *23º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental*. ABES, Campo Grande-MS.

LUCAS JÚNIOR, J.; SOUZA, C. de F. Construção e operação de biodigestores. Viçosa-MG, CTP, 2009.

Mace, S.; Bolzonella, D.; Cecchi, F.; Mata Alvarez, J. (2003) “Comparison of the biodegradability of the grey fraction of municipal solid waste of Barcelona in mesophilic and thermophilic conditions” *Water Science and Technology*.48 (4): 21-28.

MALAVOLTA, E. ABC da adubação. 4. ed. São Paulo: Agronômica “Ceres”, 1979.

Manual de Biodigestão. Disponível em <www.winrock.org.br>. Acesso em 14 abr. 2014.

MANUAL DE TREINAMENTO EM BIODIGESTÃO. Disponível em: <<http://wp2.oktiva.com.br/ider/files/2010/01/16.Manual-de-Treinamento-emBiodigestao.pdf>> Acesso em: 18 abr 2014.

Mazzucchi, O. A. J. Biodigestor rural. São Paulo, CESP, 1980. 29p.

Metcalf, A.; Eddy, M. S. Wastewater engineering: treatment and reuse. 4. ed. New York: McGraw-Hill, 2003. 1819p.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. Balanço Energético Nacional 2008: Ano base2007. Secretária de Energia, Rio de Janeiro, 2008.

Mtz. Viturtia, A.; Mata Alvarez, J.; Cecchi, F. (1995) "Two-phase continuous anaerobic digestion of fruit and vegetable waste". *Resources, Conservation and Recycling*. 14: 257-267.

Oliveira, P. A. V.; Higarashi, M. M. Geração e utilização de biogás em unidades de produção de suínos. Concórdia: Embrapa Suínos e Aves, 2006, 42p.

OLIVER, A. P. M. et al. Manual de treinamento em biodigestão. Disponível em: <<http://wp2.oktiva.com.br/ider/files/2010/01/16.Manual-de-Treinamento-em-Biodigestao.pdf>> Acesso em: 01 jun. 2014.

Pavan, P.; Battistoni, P.; Cecchi, F.; Mata Alvarez, J. (1999a) "Two-phase anaerobic digestion of source sorted OFMSQ: Performance and kinetic study". In: *International Symposium on Anaerobic Digestion of Solid Waste*, 2. Barcelona. Proceeding. Barcelona: International Association on Water Quality, 1: 91-98.

Pavan, P.; Battistoni, P.; Cecchi, F.; Mata Alvarez, J. (1999b) "Performance of thermophilic semi-dry anaerobic digestion process changing the feed biodegradability". In: *International Symposium on Anaerobic Digestion of Solid Waste*, 2. Barcelona. Proceeding. Barcelona: International Association on Water Quality, 1: 57-64.

PEREIRA, M. F. Construções Rurais. São Paulo: Nobel, 1999.

Pinto, D. M. C. L. (2000) "Avaliação da partida da digestão anaeróbia da fração orgânica de resíduos sólidos domésticos inoculados com percolato". Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, 175 p.

Pinto, D. M. C. L. (2000) “Avaliação da partida da digestão anaeróbia da fração orgânica de resíduos sólidos domésticos inoculados com percolado”. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, 175 p.

Sachs, J. von; Meyer, U.; RYS, P.; Feitkenhauer, H. New approach to control the methanogenic reactor of a two phase anaerobic digestion system. *Water Research*. v. 37, n. 5, p. 973-982, 2003.

SILVA, L. L, et al. Princípios de termoeletrônicas em pequenas propriedades rurais. In: 2º International workshop advances in cleaner production. São Paulo, maio 2009.

SOLERA, R.; ROMERO, L. I.; SALES, D. The evolution of microorganisms in a thermophilic anaerobic reactor. In: LATIN AMERICAN WORKSHOP AND SYMPOSIUM ON ANAEROBIC DIGESTION, VII, 2002, México: Mérida. ANAIS... Mérida: UNAM, 2002. p.29-34.

Souto, G. D. de B. (2005) “Efeito da variação gradual da taxa de recirculação do líquido em reatores anaeróbios híbridos na digestão da fração orgânica dos resíduos sólidos urbanos”. Dissertação de mestrado. Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, 91 p.

Souto, G. D. de B. (2005) “Efeito da variação gradual da taxa de recirculação do líquido em reatores anaeróbios híbridos na digestão da fração orgânica dos resíduos sólidos urbanos”. Dissertação de mestrado. Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, 91 p.

SOUZA, D. A.; BORGES, M. P.; PIMENTEL, S. L. B. Aproveitamento do esterco suíno as
geração de energia limpa. Disponível em:

http://paraíso.etfto.gov.br/ensino/curso/agroind/docs/aproveitamento_estercosuino.pdf.

Acesso em: 25 jun. 2014.

Souza, M. E. Fatores que influenciam a digestão anaeróbia. *Revista DAE*. v. 44, p. 88-94, 1984.

Stroot, P. G; McMahon, K.D.; Machie, R.I.; Raskin, L. (2001) “Anaerobic codigestion of municipal solid waste and biosolid under various mixing conditions: I. Digester performance”. *Water Research*. 35 (1) 1804-1816.

Stroot, P. G; McMahon, K.D.; Machie, R.I.; Raskin, L. (2001) “Anaerobic codigestion of municipal solid waste and biosolid under various mixing conditions: I. Digester performance”. *Water Research*. 35 (1) 1804-1816.

Torres Castillo, R.; LlabrésLuengo, P.; Mata Alvarez, J. (1995) “Temperatura effect on anaerobic digestion of bedding straw in a one phase sustem at diferente inoculum concentration”. *Agriculture, Exosystems and Environment*, 54: 55-66.

VIEIRA, S. M. M.; SILVA, J. W. Emissões de metano no tratamento e na disposição de resíduos. CETESB, 2006.

Vitoratto, E. Tratamento de efluentes líquidos orgânicos-Sistemas anaeróbios.

Wang, J.Y.; Xu, H.L.; Zhang, H.; Tay, J.H. (2003) “Semi-continuous anaerobic digestion of food waste using a hybrid anaerobic solid-liquid bioreactor. *Water Science and Technology*. 48 (4): 169-174.

Xu, Hai Lou; Wang, Jing.Yuan; Tay, JooHwa.(2004) “A hybrid anaerobic solid-liquid bioreactor for food waste digestion.*BiotechnologyLetters*. (24): 757-761.

ZANETTE, A. L. Potencial de aproveitamento energético do biogás no Brasil. Instituto Alberto, Rio de Janeiro, 2006.